

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

Fernanda Cristina Rodrigues de Souza

**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS DESENVOLVIDAS
EM QUARTZITOS NA REGIÃO SUDESTE DE DIAMANTINA/MG**

**Belo Horizonte
Fevereiro/2014**

Fernanda Cristina Rodrigues de Souza

**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS DESENVOLVIDAS
EM QUARTZITOS NA REGIÃO SUDESTE DE DIAMANTINA/MG**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Linha de Pesquisa: Geomorfologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. André Augusto Rodrigues Salgado

Belo Horizonte

Fevereiro/2014

S719c
2014

Souza, Fernanda Cristina Rodrigues de.
Caracterização de feições cársticas desenvolvidas em quartzitos na região sudeste de Diamantina/MG [manuscrito] / Fernanda Cristina Rodrigues de Souza – 2014.
xxi, 227 f.: il.(color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2014.

Área de Concentração: Análise Ambiental.

Orientador: André Augusto Rodrigues Salgado.

Bibliografia: f. 211-224.

Inclui anexos.

1. Carste – Teses. 2. Quartzito – Teses. 3. Geomorfologia – Teses.
I. Salgado, André Augusto Rodrigues. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551.435.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização de feições cársticas desenvolvidas em quartzitos na região sudeste de Diamantina/MG

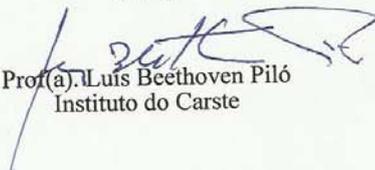
FERNANDA CRISTINA RODRIGUES DE SOUZA

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

Aprovada em 20 de fevereiro de 2014, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Andre Augusto Rodrigues Salgado - Orientador
UFMG


Prof(a). Hernando Baggio Filho
UFVJM


Prof(a). Luis Beethoven Piló
Instituto do Carste

Belo Horizonte, 20 de fevereiro de 2014.

Dedico aos meus pais.

“Os arquivos em que se acham depositados os documentos relativos à história de nosso planeta, na época geológica de que se trata, são as cavernas...”

(LUND, 1837)

AGRADECIMENTOS

Durante o processo de desenvolvimento deste estudo, muitas pessoas contribuíram para a consolidação dessa conquista e certa de que poderei esquecer alguns nomes, agradeço a todos os que incentivaram o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pesquisa; ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia; a todos os funcionários do Centro de Geologia Eschwege (CGE), Instituto Casa da Glória pelo apoio; ao Centro de Pesquisa Manuel Teixeira Guerra (CPMTC); ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela autorização para coleta de materiais nas cavidades naturais subterrâneas pesquisadas; ao Centro de Microscopia da UFMG (CM/UFMG) pelo apoio durante as análises químicas. Agradeço também ao Instituto Biotrópicos, pelo apoio logístico e à equipe da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), especialmente, o Eduardo Paim Viglio pela paciência e apoios; e à Pamella pela paciência.

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, prof. André Salgado, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos. A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia pelas experiências compartilhadas, em especial aos professores Antônio Magalhães, Fábio Soares, Adolf Horn e Cristiane Oliveira. Ao bibliotecário Rommel (CGE/IGC/UFMG) pela boa vontade, conversas e incentivos e aos secretários do CGE, Carmen e Sidney, pelo acolhimento. A todos os funcionários do CM/UFMG, em especial à Lívia, Breno, Raquel e Fernanda. Agradeço também aos professores que comporam a banca examinadora do Seminário de Dissertação, Luiz Travassos e Antônio Magalhães pelas contribuições pertinentes.

Agradeço de forma especial as pessoas que auxiliaram nas atividades de campo, especialmente à Valdinêy Leite, Manuel Dimitri, Fabrício Lopes, Ilziane Martins, Diego Rocha, Rose Lane, Alessandra Vasconcelos, Mariana Lacerda, Patrícia Lages, Janice Souza, André Maia, Matheus Simões, Carlos Henrique e Luiz Fernando.

Agradeço aos professores da Geologia pelo apoio, em especial ao Matheus e Alexandre Uhlein; ao geólogo Silas Salgado pelo apoio na descrição das lâminas delgadas, ao geólogo Vinícius pelas dicas de geologia estrutural e ao geólogo Márcio Silva pelas discussões sobre a geologia da região de Extração. Aos professores Dr. Hernando Baggio e ao Professor Ronaldo Sarmiento pela disposição e apoio. A professora Danielle Pizuama e Daniela Elói pela ajuda.

Aos amigos e colegas do Grupo Carstologia. Aos colegas da pós graduação Wallace Trindade, Elizêne Ribeiro, Maurício Amorim, Juliana Rodrigues, Rahyan Alves, Patrícia Lages, Gabriel Ávila, Daniela Elói, Pedro Barros, Joseane Biazini, Frederico Gonçalves e José Faustino. Aos amigos Tiago Santana, Kaliane Santana, Célio Duarte e Patrícia Lara Duarte. Aos colegas e funcionários do SEEDS, em especial ao Simon e à Linda por acreditarem no meu trabalho desde o início do mestrado.

A minha família, pela compreensão nos inúmeros momentos de ausência, e à minha irmã, Janice, pelas ajudas financeiras e em campo.

Muito obrigada!

RESUMO

O trabalho tem como objetivo geral caracterizar as feições cársticas desenvolvidas em rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço, na região SE de Diamantina, associando-as aos fatores litoestruturais e geomorfológicos inerentes ao desenvolvimento dessas formas. Para isso, o procedimento metodológico incluiu: a) revisão bibliográfica e levantamento cartográfico; b) investigação das feições cársticas exocársticas e hidrológicas; c) caracterização geoestatística de kamenitzas; d) caracterização das cavidades no seu contexto geográfico de inserção; e) caracterização morfológica das cavidades; f) caracterização macroscópica dos depósitos clásticos estratificados; g) análise química e caracterização microscópica de depósitos químicos; h) caracterização do contexto litoestrutural e geomorfológico de inserção das cavidades; i) interpretação do contexto geográfico local, sua relação com o desenvolvimento das feições cársticas e correlação com os dados obtidos. Os resultados obtidos demonstram que a área de estudo registra a presença de feições exocársticas e hidrológicas, além de apresentar potencial de ocorrências superior ao mapeado. A interpretação da estatística descritiva das kamenitzas demonstra que há dois tipos morfológicos de kamenitzas na área de estudo: a) as profundas, arredondadas e de dimensões menores e b) as rasas, alongadas ou ovais e de dimensões maiores. Durante as atividades de prospecção foram identificadas dez cavidades e 32 abrigos, todas as feições foram mapeadas e georreferenciadas. Após a prospecção 70% do número amostral das cavidades, ou seja, sete cavidades foram selecionadas para interpretação aprofundada. Os critérios de seleção incluíram: ocorrência de processos hidrológicos, projeção horizontal superior a 5m e presença de depósitos químicos. Conforme os critérios utilizados para caracterização e descrição das cavidades, destaca-se a ocorrência de processos hidrológicos em todas as cavidades. Esses processos ocorrem na forma de gotejamento, condensação e drenagens perenes e intermitentes. Os depósitos clásticos ocorrem na forma de areia, silte, seixos e matacão distribuídos ao longo dos condutos. Alguns depósitos clásticos estratificados também são registrados em quatro cavidades (Gruta do Salitre, Gruta Monte Cristo, Gruta Extração e Gruta Curalinho). Os principais depósitos orgânicos verificados nas cavidades são folhas, raízes e guano. E, por fim, os depósitos químicos estão presentes em todas as cavidades e ocorrem, especialmente, na forma de coralóides, crostas, represas de sílica e escorrimentos. As sete cavidades da área investigada são predominantemente horizontalizadas. A morfologia dos condutos das cavidades estudadas apresenta morfologia de teto e piso suavemente inclinados e são predominantemente concordantes à direção de caimento da vertente. Em termos gerais, as galerias e salões possuem morfologias retangulares, triangulares e elípticas horizontais. Os trabalhos qualitativos com uso de MEV e EDS linha nas amostras de depósitos químicos na área de estudo apontam variedades de elementos químicos, principalmente Ca, Si e Na. As imagens microscópicas dos depósitos químicos com o uso do MEV indicam variações na concentração de mineral, e indicam prováveis oscilações nas condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento dos espeleotemas. A relação entre litoestrutura, geomorfologia, clima e hidrografia podem ter contribuído para a formação das cavidades e feições exocársticas na região SE de Diamantina. A composição polimineralógica e politextural da rocha favorece o desenvolvimento de feições cársticas. Os fatores estruturais associados ao desenvolvimento das cavidades na região SE de Diamantina são, primeiramente, os planos de fratura, seguido do mergulho do acamamento e planos de foliação. Assim, a interação entre esses tipos de lineamentos estruturais contribuem com a formação e morfologia planimétrica das cavidades existentes. A geomorfologia local contribui para o desenvolvimento de cavidades, pois a ocorrência das cavidades é concordante com a inclinação da vertente e há relação positiva entre gradiente do relevo local e o desnível das cavidades. Destaca-se também que a presença de escarpas dissecadas são áreas favoráveis à ocorrência de cavidades, o que ocorre porque contribui para a remobilização mecânica dos grãos alterados. Nesse sentido, constata-se que o contexto geográfico constituído por vários condicionantes favorece a presença das feições cársticas na região SE de Diamantina/ MG.

Palavras-chave: Feições Cársticas; Quartzito; Geomorfologia; Caracterização Geral.

ABSTRACT

The main objective of this study is to characterize the karst features developed in Espinhaço Supergroup quartzite rocks, in the southeastern region of Diamantina, associating them with lithostructural and geomorphological factors inherent in the development of these forms. For this, the methodological procedure included: a) literature review and mapping in b) exokarstic and fluviokarstic karst features investigation; c) kamenitzas geostatistical characterization d) caves characterization in its geographical context of insertion; e) caves morphological characterization; f) macroscopic characterization of laminated clastic deposits; g) chemical analysis and microscopic characterization of chemical deposits; h) characterization of lithostructural and geomorphological contexts of the insertion of the caves; i) interpretation of the local geographical context, its relationship to the karst features development and its correlation with the data obtained. The results demonstrate that the study area records the existence of exokarstic and fluviokarstic features, as well as presents higher occurrence potential than mapped. The interpretation of kamenitzas descriptive statistics reveals that there are two kamenitzas morphological types in the study area: a) the deep, rounded and smaller ones and b) the shallow, elongated or oval and larger ones. During the prospecting activities, ten caves and 32 shelters were identified, all features were mapped and georeferenced. After the prospection, 70% of the caves sample number, which is a number of seven caves, was selected for detailed interpretation. The selection criteria included: occurrence of hydrologic processes, horizontal projection upper 5m and the chemical deposits presence. In accordance to the criteria used for characterization and description of caves, the occurrence of hydrological processes in all the caves stands out. These processes occur in the forms of dripping, condensation and perennials and intermittent drainages. The clastic deposits occur in the form of sand, silt, pebbles and boulders distributed along the ducts. Some laminated clastic deposits are also noted in four caves (Salitre, Monte Cristo, Extração and Curralinho Caves). The main organic deposits observed in the caves are leaves, roots and guano. Finally, the chemical deposits are found in all the caves and occur especially in the form of coralloides, scabs, silica dams and bleeding. All the seven caves in the studied area are predominantly flatter. The conduits morphology of the studied caves presents the ceiling and floor morphologies gently sloping and is predominantly concordant to the trim direction of the slope. Generally, the galleries and halls have rectangular, triangular and elliptical horizontal morphologies. The qualitative studies using SEM and EDS line in samples of chemical deposits in the study area indicate varieties of chemical elements, especially Ca, Si and Na. The chemical deposits microscopic images using the SEM data indicate variations in the mineral concentration and indicate probable fluctuations in environmental conditions favorable to the development of speleothems. The relationship between lithostructure, geomorphology, climate and hydrography may have contributed to the formation of caves and exokarstic features in the the SE region of Diamantina. The polymineralogical and polytextural rock composition favors the development of karst features. Structural factors associated to the caves development in the SE region of Diamantina are primarily the fracture planes, followed by dipping bedding and foliation planes. Therefore, the interaction between these types of structural lineaments contributes to the formation and planform of existing caves. The local geomorphology contributes to the development of caves, since the occurrence of caves agrees to the slope inclination and there is a positive relationship between the gradient of the slope and the local relief of the caves. Also noteworthy is that the presence of escarpments dissected is a favorable area to the occurrence of caves, which happens because it contributes to the mechanical remobilization of altered grains. Accordingly, it appears that the geographical context consisting of several conditions favors the karst features presence in the SE region of Diamantina/MG.

Keywords: Karst Features; Quartzite; Geomorphology; General Characterization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Processo de Dissolução da Sílica e Formação de Feições Cársticas	32
FIGURA 2.2 - Modelo de formação de galerias por arenização e piping	33
FIGURA 2.3 - Feições cársticas em rochas siliciclásticas	42
FIGURA 2.4 - Torres em rochas quartzíticas na região de Itambé do Mato Dentro	43
FIGURA 2.5 - Exemplo de cavidade natural em rochas quartzíticas no Parque Estadual do Rio Preto	48
FIGURA 2.6 - Espeleotemas desenvolvidos em rochas siliciclásticas na região de Itambé do Mato Dentro	50
FIGURA 3.1 - Localização da área de estudo	52
FIGURA 3.2 - Serra do Espinhaço Meridional (SdEM)	53
FIGURA 3.3 - Blocos diagrama de representação da formação e desenvolvimento do Supergrupo Espinhaço	56
FIGURA 3.4 - Geologia da área de estudo	58
FIGURA 3.5 - Estratigrafia Geral da área de estudo	59
FIGURA 3.6 - Declividade da SdEM e da área de estudo	64
FIGURA 3.7 - Hidrografia da área de estudo associada os lineamentos estruturais	66
FIGURA 5.1 - Feições exocársticas na região SE de Diamantina	82
FIGURA 5.2 - Feições exocársticas residuais em quartzito na região SE de Diamantina	83
FIGURA 5.3 - Feições exocársticas em quartzito na região SE de Diamantina	84
FIGURA 5.4 - Depressões de infiltração hídrica em quartzito na região SE de Diamantina..	86
FIGURA 5.5 - Hidrologia de superfície na região SE de Diamantina	87
FIGURA 5.6 - Feições hidrológicas na região SE de Diamantina	88
FIGURA 5.7 – Ressurgência intermitente na área de estudo	88
FIGURA 5.8 - Tipos de kamenitzas da área de estudo	94
FIGURA 5.9 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a profundidade média central das kamenitzas	96
FIGURA 5.10 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a extensão média do eixo maior de desenvolvimento das kamenitzas	97
FIGURA 5.11 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a extensão média do eixo menor de desenvolvimento das kamenitzas	98
FIGURA 6.1 - Localização das feições endocársticas identificadas na região SE de Diamantina	104

FIGURA 6.2 - Vestígios de uso dos abrigos para moradia	105
FIGURA 6.3 - Feições geológicas no interior das cavidades na região SE de Diamantina..	108
FIGURA 6.4 - Processos hidrológicos nas cavidades na região SE de Diamantina	110
FIGURA 6.5 – Características morfológicas da Gruta Monte Cristo	113
FIGURA 6.6 - Topografia da planta baixa Gruta Monte Cristo	114
FIGURA 6.7 – Perfis de cortes transversais da Gruta Monte Cristo	115
FIGURA 6.8 - Topografia da Gruta da Ressurgência	117
FIGURA 6.9 – Topografia da Lapa Ribeirão do Inferno	118
FIGURA 6.10 – Características da Lapa Ribeirão do Inferno (A) e Gruta da Ressurgência (B)	119
FIGURA 6.11 – Perfis de cortes transversais da Gruta Curralinho	120
FIGURA 6.12 – Perfis de cortes transversais da Gruta Curralinho	121
FIGURA 6.13 – Características morfológicas da Gruta do Salitre	124
FIGURA 6.14 – Topografia da planta baixa da Gruta Extração	125
FIGURA 6.15 – Perfis de cortes transversais da Gruta Extração	126
FIGURA 6.16 – Topografia da planta baixa da Gruta do Salitre	127
FIGURA 6.17 – Topografia da Gruta das Sempre Vivas	128
FIGURA 7.1 - Cortes de depósitos clásticos nas cavidades na região SE de Diamantina....	131
FIGURA 7.2 - Depósitos clásticos na Gruta Curralinho	133
FIGURA 7.3 - Depósitos clásticos na Gruta do Salitre	134
FIGURA 7.4 - Depósitos clásticos na Gruta Monte Cristo	136
FIGURA 7.5 - Depósitos clásticos na Gruta Extração	137
FIGURA 7.6 - Deposição química nas cavidades na região SE de Diamantina	139
FIGURA 7.7. Depósito químico de escorrimentos (A e B) Gruta das Sempre Vivas (GSV01), (C) Gruta Extração (GE05), (D) Gruta do Salitre (GS06) e estalagmites da (E, f e G) Gruta Extração GE02, zonas 1, 2 e 3, (H, L) GE03 zonas 1 e 2 e (H, I e J) GE04 zonas 1, 2 e 3 ..	145
FIGURA 7.8 - Concentração Química Geral nas amostras de escorrimentos	146
FIGURA 7.9 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites	147
FIGURA 7.10 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites	147
FIGURA 7.11 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites	148
FIGURA 7.12 – Distribuição de cada elemento químico em amostras de escorrimentos	149
FIGURA 7.13 - Distribuição química de cada elemento químico em amostras de estalagmites	151

FIGURA 7.14 - EDS Linha. Distribuição química de cada elemento químico nos espeleotemas	152
FIGURA 8.1 - Perfis geomorfológicos e litoestruturais da área de estudo	156
FIGURA 8.2 - Estratigrafia da área de estudo	158
FIGURA 8.3 - Caracterização microscópica das rochas da área de estudo	161
FIGURA 9.1 - Lineamentos estruturais na área de estudo	168
FIGURA 9.2 - Lineamentos estruturais na área de estudo	169
FIGURA 9.3 - Curvas anômalas dos segmentos fluviais superficiais na região SE de Diamantina/MG	170
FIGURA 9.4 - Direções dos segmentos fluviais superficiais na área de estudo	172
FIGURA 9.5 - Lineamentos estruturais na região SE de Diamantina	173
FIGURA 9.6 – Lineamentos estruturais na Gruta da Ressurgência	174
FIGURA 9.7 – Lineamentos estruturais na Gruta Curralinho	174
FIGURA 9.8 – Lineamentos estruturais na Gruta Monte Cristo	176
FIGURA 9.9 – Lineamentos estruturais na Gruta Extração	177
FIGURA 9.10 – Lineamentos estruturais na Gruta do Salitre	178
FIGURA 9.11 – Lineamentos estruturais na Gruta das Sempre Vivas	179
FIGURA 9.12 – Lineamentos estruturais na Lapa Ribeirão do Inferno	179
FIGURA 9.13 – Correlação direção dos planos de fratura internos, direção dos condutos e morfologia planimétrica das cavidades	181
FIGURA 9.14 – Contexto estrutural de inserção das cavidades da região SE de Diamantina/MG	183
FIGURA 10.1 – Geomorfologia da área de estudo	188
FIGURA 10.2 – Contexto geomorfológico local	189
FIGURA 10.3 - Modelo digital de elevação da área de estudo	190
FIGURA 10.4 – Perfis topográficos da área de estudo	191
FIGURA 10.5 – Perfis topográficos das vertentes de inserção das cavidades na área de estudo	192
FIGURA 11.1 – Hipótese de formação das feições cársticas na região SE de Diamantina..	206

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 - Estratigrafia do Supergrupo Espinhaço	54
QUADRO 3.2 - Estratigrafia da Formação Sopa-Brumadinho	55
QUADRO 5.2 - Características das kamenitzas da área de estudo	102
QUADRO 6.1 - Relação entre as cavidades e sua inserção conforme os indicadores geomorfológicos	107
QUADRO 6.2 - Características Morfométricas Gerais das Cavidades da Região Sudeste de Diamantina/MG	129
QUADRO 7.1 - Depósitos químicos selecionados para análise	140
QUADRO 7.2 - Características macroscópicas de escorrimentos	141
QUADRO 7.3 - Características macroscópicas de estalagmites	142
QUADRO 7.4 - Características físicas das amostras observadas em microscópio óptico ...	143
QUADRO 8.1 - Composições químicas, mineralógicas e texturais da litologia de inserção das cavidades	160
QUADRO 9.1 - Relação entre direção preferencial dos planos de fraturamento internos e dos condutos das cavidades	180
QUADRO 10.1 - Gradiente de relevo e projeção horizontal das cavidades	193
QUADRO 11.1 - Indicadores que contribuem e inibem o desenvolvimento de feições cársticas	197
QUADRO 11.2 - Contexto litológico da Bacia do Rio Jequitinhonha	201

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 - Solubilidade da Sílica em função do Ph	38
GRÁFICO 2.2 - Efeito do pH e da temperatura na solubilidade do quartzo e da sílica amorfa	39
GRÁFICO 3.1 – Precipitação e temperatura em Diamantina/MG no período de jul/2008 a jul/2012	62
GRÁFICO 5.1 – Profundidade média central das kamenitzas	89
GRÁFICO 5.2 – Extensão do eixo maior das kamenitzas	90
GRÁFICO 5.3 – Extensão do eixo menor das kamenitzas	90
GRÁFICO 5.4 - Histograma dos parâmetros morfométricos profundidade central (A) e extensão do eixo menor (B) das kamenitzas amostradas na área de estudo	92
GRÁFICO 5.5 - Histograma do parâmetro morfométrico extensão do eixo maior das kamenitzas amostradas na área de estudo	93
GRÁFICO 5.6 – Relação dos parâmetros profundidade média central, extensão do eixo maior e menor das kamenitzas com a elevação	94
GRÁFICO 6.1 - Inserção das cavidades conforme o tipo de relevo e a declividade	106
GRÁFICO 6.2 - Inserção das cavidades conforme a altitude	106
GRÁFICO 6.3 - Inserção das cavidades no vertente	107
GRÁFICO 6.4 - Feições geológicas no interior das cavidades na região SE de Diamantina	108
GRÁFICO 6.5 - Processos hidrológicos nas cavidades na região SE de Diamantina	109
GRÁFICO 6.6 - Projeção horizontal das cavidades na região SE de Diamantina	111
GRÁFICO 6.7 - Quantidade de entradas nas cavidades na região SE de Diamantina	111
GRÁFICO 6.8 - Projeção Horizontal das cavidades em rochas siliciclásticas no Brasil e na região SE de Diamantina/MG	130
GRÁFICO 7.1 - Presença de depósitos clásticos nas cavidades na região SE de Diamantina	131
GRÁFICO 8.1 – Inserção das cavidades no contexto estratigráfico da Formação Sopa-Brumadinho	155
GRÁFICO 8.2 - Média da composição geoquímica de elementos maiores em quartzitos da Formação Sopa Brumadinho na área de estudo	163
GRÁFICO 8.3 - Média da composição geoquímica de elementos maiores em clastos de formação ferríferas de ortoconglomerados da Formação Sopa Brumadinho na área de estudo	163

GRÁFICO 9.1 - Relação entre a direção dos lineamentos estruturais internos e a direção dos condutos das cavidades	182
GRÁFICO 10.1 – Tipologia de Desenvolvimento das cavidades	191
GRÁFICO 10.2 – Relação gradiente de relevo local e projeção horizontal das cavidades ..	193
GRÁFICO 10.3 – Relação gradiente de relevo local e desnível das cavidades	194
GRÁFICO 11.1 – Concentração de Cátions e TDS na bacia do Rio Jequitinhonha	200
GRÁFICO 11.2 - Relação entre a dimensão morfométrica das cavidades e o contexto litológico	202
GRÁFICO 11.3 – Taxas de lixiviação de solos originados de rochas da Formação Sopa-Brumadinho	203

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Energia de formação de cátions e minerais primários silicatados	29
TABELA 2.2 - Energia de formação e quebra da estrutura de minerais primários silicatados	29
TABELA 2.3 - Solubilidade de diferentes formas de sílica	36
TABELA 2.4 - Solubilidade de Minerais	36
TABELA 2.5 - Solubilidade da sílica em diferentes temperaturas	37
TABELA 4.4.1 - Identificação dos tipos de amostras selecionadas para análise química	74
TABELA 5.1 - Ocorrência de feições hidrológicas	88
TABELA 5.2 - Estatística Descritiva Geral das Kamenitzas	91
TABELA 5.3 - Ocorrência de feições dolinas de dissolução	100
TABELA 5.4 - Ocorrência de feições hidrológicas	101
TABELA 5.5 - Características gerais das kamenitzas e suas áreas de ocorrência	101

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2.1 - Hidrólise da sílica	30
EQUAÇÃO 2.2 - Dissociação do ácido silícico	31
EQUAÇÃO 4.5.1 - Cálculo de gradiente do relevo local	80

LISTA DE ABREVIATURAS

Al: Alumínio

BRCA: *British Cave Research Association*

Ca: Cálcio

[Ca(NO₃)₂ 4H₂O]: Nitrocalcita ou nitrato de cálcio

CECAV: Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

CGE: Centro de Geologia Eschwege

CM: Centro de Microscopia

CPMTC: Centro de Pesquisa Manuel Teixeira Costa

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CXbd: CAMBISSOLOS Háplicos argila de atividade baixa distróficos

Cwb: Mesotérmico

D: Distância

Degeo: Departamento de Geologia

DNPM: Departamento Nacional de Pesquisa

E: Leste

EDX ou EDS: *Energy Dispersive X-Ray Detector* ou Espectometria de Energia Dispersiva

Embrafoto: Empresa Brasileira de Fotografias Aéreas S/C Ltda

ESE: Leste sudeste

F: Flúor

Fe: Ferro

FEG: *Field Emission Gun* ou Canhão por Efeito de Campo

H: Hidrogênio

H₂CO₃: Ácido carbônico

H₄SiO₄: Ácido silícico

H₄SO₄: Ácido sulfúrico

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IGC: Instituto de Geociências

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

K: Potássio

Ka: Constante alfa

Kb: Constante beta
KNO₃: Nitrato de potássio
Ma: Milhões de anos
MDE: Modelo Digital de Elevação
MEV ou SEM: Microscópio Eletrônico de Varredura ou *Scanning Eletron Microscopy*
MG: Minas Gerais
Mg: Magnésio
mg/l: miligrama por litro
MMA: Ministério do Meio Ambiente
N: Norte
Na: Sódio
NE: Nordeste
NW: Noroeste
mm: milímetro
O: Oxigênio
OH: hidroxila
pH: Potencial Hidrogeniônico
PH: Projeção horizontal
RLd: NEOSSOLOS Litólicos distróficos
S: Sul
SdEM: Serra do Espinhaço Meridional
SE: Sudeste
SEE: Sociedade Excursionista Espeleológica
Si: Silício
SiO₂: Dióxido de silício
SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*
Sisbio: Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade
SW: Sudoeste
UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto
USAF: *United States Air Force*
W: Oeste
WNW: Oeste noroeste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. GEOMORFOLOGIA DOS AMBIENTES CÁRSTICOS	25
2.1. O Conceito de Carste	25
2.2. Propriedades da Sílica	27
2.3. Processos de Solubilização e Formação das Feições Cársticas em Rochas Siliciclásticas	30
2.3.1. Dissolução da Sílica	30
2.3.2. Remobilização Mecânica dos Grãos Alterados ou “Piping”	32
2.4. Fatores Controladores da Dissolução da Sílica	34
2.4.1. Rochas Siliciclásticas e Controle Litoestrutural	34
2.4.1.1. Estruturação Mineralógica da Sílica	36
2.4.2. Precipitação, Temperatura e pH	37
2.4.3. Sais e Compostos Orgânicos e Inorgânicos	39
2.5. Feições Cársticas	40
2.5.1. Feições Superficiais: exocarste	40
2.5.1.1. Feições Hidrológicas	44
2.5.2. Feições do Ambiente Subterrâneo: endocarste	45
2.5.2.1. Cavidades Naturais Subterrâneas	45
2.5.2.2. Depósitos Químicos, Clásticos e Orgânicos	48
3. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO	52
3.1. Localização da Área de Estudo	52
3.2. Contexto Geológico	52
3.2.1. Geologia Regional	52
3.2.2. Geologia Local	57
3.2.2.1. Geologia Estrutural	61
3.3. Clima	61
3.4. Geomorfologia	62
3.4.1. Geomorfologia Regional	62
3.5. Hidrografia	65
3.6. Solos e Vegetação	66

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	68
4.1. Revisão Bibliográfica e Levantamento Cartográfico	68
4.2. Caracterização Geral das Feições Exocársticas e Hidrológicas	68
<i>4.2.1. Caracterização Geoestatística das Kamenitzas</i>	70
4.3. Caracterização das Cavidades e seu Contexto Geográfico de Inserção	71
4.3.1. Caracterização Morfológica das Cavidades	72
4.4. Caracterização de depósitos químicos e depósitos clásticos estratificados	73
4.5. Caracterização dos Fatores Litoestruturais Associados ao Desenvolvimento das Cavidades	76
<i>4.5.1. Contexto Litológico de Inserção das Cavidades</i>	76
<i>4.5.2. Contexto Estrutural de Inserção das Cavidades</i>	77
<i>4.5.3. Contexto Geomorfológico de Inserção das Cavidades</i>	79
<i>4.5.4. Contexto Geográfico de Inserção das Feições Cársticas</i>	80
5. CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES EXOCÁRSTICAS	81
5.1. Caracterização Geoestatística de Kamenitzas na Região Sudeste de Diamantina	89
5.2. Discussões	99
6. CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES ENDOCÁRSTICAS	103
<i>6.1. Contextualização Geral de Inserção das Cavidades na Paisagem</i>	105
6.2. Caracterização Morfológica das Cavidades	112
6.2.1. Gruta Monte Cristo	112
6.2.2. Gruta da Ressurgência	115
6.2.3. Lapa Ribeirão do Inferno	116
6.2.4. Gruta Curralinho	119
6.2.5. Gruta Extração	121
6.2.6. Gruta do Salitre	122
6.2.7. Gruta das Sempre Vivas	126
6.3. Discussões	129

7. DEPÓSITOS QUÍMICOS E CLÁSTICOS NAS CAVIDADES DA REGIÃO SE DE DIAMANTINA	131
7.1. Deposição Clástica Estratificada	131
7.2. Deposição Química	138
7.2.1. Características Macroscópicas	140
7.2.2. Imagem Microquímica dos Espeleotemas	143
7.2.3. Concentração Química Geral	144
7.2.4. Distribuição dos Elementos Químicos nas Amostras	149
7.3. Discussões	153
8. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO LITOLÓGICO DE INSERÇÃO DAS CAVIDADES	155
8.1. Discussões	161
9. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO ESTRUTURAL DE INSERÇÃO DAS CAVIDADES	167
9.1. Discussões	184
10. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO DE DESENVOLVIMENTO DAS CAVIDADES	187
10.1. Discussões	194
11. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CONTEXTO GEOGRÁFICO DE INSERÇÃO DAS FEIÇÕES CÁRSTICAS NA REGIÃO SUDESTE DE DIAMANTINA/MG	196
12. CONSIDERAÇÕES FINAIS	207
REFERÊNCIAS	212
ANEXOS	225

1. INTRODUÇÃO

A geomorfologia cárstica é caracterizada por feições específicas, que tem a dissolução como principal processo genético. Devido, principalmente, ao contexto geográfico de origem das pesquisas ser o *carste clássico*¹, o desenvolvimento das feições típicas deste ambiente foram associadas às rochas carbonáticas. Entretanto, a identificação destas geoformas em rochas siliciclásticas e em formações ferríferas tem estimulado a elaboração de pesquisas para compreender seus processos, características e gêneses.

Embora não haja consenso sobre a utilização do termo carste, independentemente da litologia encaixante, desde o final da década de 1970 são realizados alguns trabalhos científicos (MARTINI, 1979; 1984; URBANI, 1986a; 1986b) sobre as feições cársticas em rochas siliciclásticas. Porém, a maioria dos estudos é incipiente, de cunho generalizado e qualitativo. Estes trabalhos são importantes, pois permitem a divulgação e conhecimento das características gerais destas feições, mas é preciso que a ciência também busque explicações para as feições identificadas através da interpretação dos processos envolvidos na sua formação. Além disso, inexistem bases de dados suficientes para esclarecer os mecanismos que favorecem o surgimento dessas feições em rochas não carbonáticas. Em contrapartida, o percentual de áreas potenciais a serem pesquisadas neste tipo de rocha é superior ao conhecido².

A região Sudeste (SE) de Diamantina é caracterizada pela existência de feições cársticas desenvolvidas em quartzitos do Supergrupo Espinhaço. Estas feições não foram sistematicamente estudadas até o momento e suas ocorrências podem estar associadas a um conjunto de fatores litológicos, estruturais, hidrológicos e geomorfológicos. Por isso, o objetivo geral da pesquisa é caracterizar as feições cársticas desenvolvidas em rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço, na região SE de Diamantina, associando-as aos fatores litoestruturais e geomorfológicos inerentes ao desenvolvimento dessas formas. Os objetivos específicos são:

- Executar a prospecção das feições cársticas presentes na área pesquisada;
- Gerar mapas de distribuição espacial e caracterização geral das cavidades e de feições exocársticas e hidrológicas, relacionando-as ao contexto geomorfológico da área de estudo;

¹ Este termo refere-se, cientificamente, à região situada a nordeste da Itália, noroeste da Eslovênia (FORD; WILLIAMS, 2007).

² Conforme Auler e Piló (2011a), estima-se que 1% das cavidades desenvolvidas em quartzitos é conhecida no Brasil e o potencial existente é superior a 50.000 cavidades.

- Apresentar as características morfológicas e geoestatísticas das kamenitzas identificadas;
- Realizar a caracterização geoespeleológica e morfológica das cavidades;
- Representar as características macroscópicas dos depósitos clásticos estratificados segundo os critérios de cor, textura, altura, extensão e organização estratigráfica;
- Avaliar a composição química qualitativa dos depósitos químicos, associado a suas características macro e microscópicas;
- Investigar como o contexto litoestrutural local pode contribuir para o desenvolvimento das cavidades;
- Caracterizar no contexto geomorfológico de inserção das cavidades, correlacionando este indicador com os parâmetros morfométricos de projeção horizontal e desnível;
- Interpretar o contexto geográfico de inserção das feições cársticas e as variáveis associadas ao seu desenvolvimento, tendo como base a correlação dos dados obtidos.

A realização do trabalho justifica-se pela existência de poucos estudos sobre as feições cársticas na área investigada, embora o potencial espeleológico seja superior ao cadastrado. Além disso, uma das cavidades deste estudo, a Gruta do Salitre, corresponde a um dos principais atrativos turísticos de Diamantina e está sob a gestão do Instituto Biotrópicos (AZEVEDO; ARAÚJO, 2011). Neste sentido, este trabalho pode contribuir para as atividades de gestão ambiental, planejamento turístico e educação ambiental local.

2. GEOMORFOLOGIA DOS AMBIENTES CÁRSTICOS

2.1. O Conceito de Carste

O termo *karst* corresponde à expressão germânica originada da palavra pré-indo-européia "*Krs* ou *kras*", que significa, genericamente, terreno rochoso ou rocha nua. O *kras* corresponde à denominação dada pelos eslovenos aos planaltos carbonáticos da região situada a nordeste da Itália e noroeste da Eslovênia, onde surgiram os primeiros estudos científicos sobre as características específicas da geomorfologia desses ambientes. Por isso, essa região é conhecida como o "carste clássico" (JENNINGS, 1971; SWEETING, 1972).

Quando essa região passou a pertencer ao império Austro-Húngaro, a expressão *Kras* foi traduzida para o germânico. Com os trabalhos de Cvijic e da Escola de Viena, que exerceu influência significativa no desenvolvimento de trabalhos científicos, a expressão germânica passou a ser difundida internacional e cientificamente. A partir do desenvolvimento da ciência, a palavra germânica foi transcrita para o português do Brasil (*carste*); espanhol, italiano e português de Portugal (*carso*); inglês e alemão (*karst*) (JENNINGS, 1985; FORD; WILLIAMS, 2007).

No início do século XX, os pesquisadores destacaram a importância da água acidulada como o principal agente de formação geomorfológica das áreas cársticas. Por isso, em 1901, Cvijic cria a expressão "carstificação", com o objetivo de diferenciar os processos envolvidos na formação do relevo cárstico daqueles ambientes originados pela erosão fluvial. Esse período foi marcado pelos estudos sobre os modelos evolutivos do carste criados por Grund e Cvijic (JENNINGS, 1971; PILÓ, 1998; FORD; WILLIAMS, 2007).

Assim, o karst é utilizado para se referir às áreas geomorfológicas com características específicas geradas, principalmente, pela circulação da água em rochas quimicamente solúveis. Os ambientes cársticos são caracterizados pela presença de cavidades naturais subterrâneas, sistemas de drenagens com fluxos intermitentes, áreas subterrâneas e vales com canais de drenagens (vales secos) decorrentes da solubilização da rocha (JENNINGS, 1971; GILLIESON, 1996; FORD; WILLIAMS, 2007).

Destaca-se que a dissolução não é o processo único ou exclusivo a ocorrer em áreas cársticas. Ocorrem processos físicos de subsidência ou abatimento, erosão e outros processos químicos, como a precipitação de minerais. Da mesma forma, todas as rochas são solúveis em água em determinadas condições ambientais (JENNINGS, 1971); porém, em ambientes cársticos, a dissolução desempenha, significativamente, o papel mais importante que em outras paisagens. Nesse contexto, os estudos clássicos admitiam que apenas as rochas

carbonáticas fossem passíveis à dissolução e, por isso, relacionaram o desenvolvimento da morfologia cárstica exclusivamente a esse tipo de rocha. As morfologias semelhantes ao carste desenvolvidas em litologias não carbonáticas foram denominadas pseudocarste, pois era atribuída a elas a incapacidade de dissolução química (HARDT, 2003; HARDT, 2004).

No entanto, a identificação de feições semelhantes às cársticas, desenvolvidas em rochas não carbonáticas, levaram a questionamentos conceituais sobre a terminologia empregada (JENNINGS, 1985; URBANI, 1986a; GÁLAN, 1991; YOUNGER *et al.*, 1995; WRAY, 2003). Urbani (1986a) destaca que o termo carste passou a ser utilizado abusivamente para formas e litologias diferentes do carste clássico, por isso tem perdido o seu sentido original. O autor defende que a expressão carste deve se restringir às feições desenvolvidas em rochas predominantemente carbonáticas (como calcário e dolomito) e sugere a utilização de outro termo para as formas de rochas quartzíticas. Entre as principais terminologias recomendadas pelo autor, destaca-se: pseudocarste, carste quartzítico e paracarste quartzítico.

Já Andreychouk *et al.* (2010) considera o uso do termo carste não tradicional para o relevo cárstico desenvolvido em litologias não carbonáticas. Logo, constatou-se que as rochas siliciclásticas³, em condições naturais do ambiente, podem apresentar geoformas típicas de dissolução, mas requerem maior tempo para solubilizar se comparado aos carbonatos.

Assim, apesar das ocorrências de feições cársticas serem mais comuns em rochas carbonáticas (calcita e dolomita); elas também podem ser desenvolvidas em rochas evaporíticas (como a halita, gipso e anidrita), formações ferríferas (como itabirito, canga e ferricrete) e siliciclásticas (como arenitos, quartzitos ou granitos). Vale ressaltar que devido à alta solubilidade das rochas evaporíticas, a ocorrência de feições cársticas nessas rochas é observada apenas em áreas de climas secos e as feições em rochas siliciclásticas, por sua vez, são mais comuns em ambientes de clima tropical úmido (JENNINGS, 1971; FORD; WILLIAMS, 2007).

Piló (1998) destaca que a indefinição conceitual reside em saber quais os critérios que qualificam uma paisagem como cárstica. Segundo White (1988), é necessário que o transporte de massa em solução seja mais importante que o transporte de massa por outros processos. Entretanto, em termos morfogênicos, esses mecanismos são marcados por descontinuidades, geralmente, complexas de serem mensuradas.

³ Rochas siliciclásticas são rochas clásticas compostas quase que exclusivamente por quartzo e/ou silicatos (SUGUIO, 1998).

A drenagem contribui para a configuração de morfologia peculiar em áreas superficiais e subterrâneas. Todavia, Jennings (1971; 1985) defende que a drenagem subterrânea não deve ser tomada como elemento definidor do carste, pois é comum a sua ocorrência em áreas não cársticas, como por exemplo, nas regiões vulcânicas.

Considerando-se que a origem do termo carste está associada aos aspectos morfológicos, argumenta-se que a definição de uma paisagem como cárstica deve estar relacionada à representatividade do conjunto de formas do relevo condicionadas por processo de intemperismo químico, mesmo que este não seja dominante. Portanto, argumenta-se (JENNINGS, 1971; 1985; URBANI, 1996a,b; WHITE, 1988; PILÓ, 1998; HARDT, 2004) que a definição deve ter como base os processos envolvidos e não exclusivamente a litologia encaixante.

Dessa forma, o pseudocarste deve se referir a paisagens que resultam de processos diferentes da dissolução, como os mecânicos. Os tipos de pseudocarste podem ser classificados, conforme os fatores específicos que condicionaram a formação da paisagem, como por exemplo: *vulcanocarste* (originados por processos vulcânicos) ou *criocarste* (relacionados aos processos glaciais) (JENNINGS, 1971; SUGUIO, 1999). Registra-se que as feições cársticas são resultados de processos superficiais e subterrâneos que, juntos, favorecem o surgimento destas formas. Assim, definir o carste em litologias não carbonáticas requer estudos aprofundados (TRAVASSOS *et al.*, 2012).

Martini (1979) ratifica que, embora haja o predomínio quantitativo dos processos mecânicos, a dissolução desempenha papel fundamental no início do processo de carstificação das rochas siliciclásticas. A compreensão desse processo requer o conhecimento das propriedades físicas e mineralógicas da sílica.

2.2. Propriedades da Sílica

A sílica, principal elemento que compõe as rochas siliciclásticas, possui pouca susceptibilidade à dissolução em condições naturais de temperatura e pH (KRAUSKOPF, 1972) e isso está relacionado às propriedades específicas dos silicatos. Essas propriedades, por sua vez, podem refletir na configuração geomorfológica e desenvolvimento das feições cársticas. O termo sílica refere-se aos compostos de dióxido de silício (SiO_2) que se apresenta nas formas de sílicas cristalinas, vítreas e amorfas. A sílica cristalina refere-se ao grupo mineral que possui arranjo estrutural cristalino e pode ser encontrada na natureza em diferentes formas polimorfas. Entre as formas mais comuns, destaca-se o quartzo, cristobalita,

tridimita, chalcedonia, moganita, keatita, coesita e stishovita (SHELLEY, 1975; KLEIN, HURLBUT JUNIOR, 1999).

A sílica amorfa (sílica gel ou sílica coloidal), além da sílica na forma vítrea, consiste em conjunto de pequenas partículas de sílica, hidratada ou não. Ela possui a mesma composição química da sílica cristalina, porém o arranjo estrutural não é definido. A sílica amorfa é formada por condensações lançadas por erupções vulcânicas ou por depósitos de soluções saturadas. Os seus tipos mais comuns na crosta terrestre são lechatelierita (sílica vidro), calcedônio e opala. A polimerização deste tipo de estrutura é obtida em temperaturas ambientes baixas e na presença de soluções ligeiramente ácidas (SHELLEY, 1975).

O quartzo, mineral mais comum na litosfera, possui diferentes variedades em função do grau de cristalinidade e da cor. As variedades microcristalinas de quartzo são associadas, geralmente, à precipitação de soluções aquosas e ocorrem como cimentante, preenchendo vazios de rochas vulcânicas e sedimentares. Esse mineral é caracterizado por ligações internas fortes, além de estabilidade química e mecânica, o que confere resistência à dissolução (KELLER, 1968). Por isso, em sílica cristalina, até o momento, não há registros de desenvolvimento de feições cársticas.

A TAB. 2.1 mostra a energia necessária para a formação de cátions e dos minerais primários silicatados. Essa energia está relacionada à força de ligação entre os elementos químicos que formam o mineral. Portanto, percebe-se que os minerais silicatados destacam-se como aqueles que apresentam as maiores forças de ligação interna para formar suas estruturas e essas energias são mais de três vezes superior à força de ligação do Ca^{2+} (principal componente das rochas carbonáticas).

Entre os minerais primários silicatados (TAB.⁴ 2.2), percebe-se que a energia total gasta para romper as ligações internas e quebrar a estrutura do mineral é significativa e aumenta em direção aos tectossilicatos (o quartzo faz parte deste grupo de minerais silicatados). Esses indicadores, portanto, justificam as razões que tornam o quartzo resistente ao intemperismo.

⁴ As abreviações TAB., FIG. e GRAF. referem-se respectivamente à tabela, figura e gráfico e atendem aos critérios definidos na NBR 14724:2011 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

TABELA 2.1

Energia de formação de cátions e minerais primários silicatados

Íon	Kg cal/mol
K ⁺	299
Na ⁺	322
H ⁺ (em OH)	515
Ca ²⁺	839
Mg ²⁺	912
Fe ²⁺	919
Al ³⁺ (não estrutural)	1793
Al ³⁺ (estrutural)	1878
Si ⁴⁺ (nesossilicato)	3142
(inossilicato de cadeia simples)	3131
(inossilicato de cadeia dupla)	3127
(filossilicato)	3123
(tectossilicato)	3110

Fonte: Keller (1968)

TABELA 2.2

Energia de formação e quebra da estrutura de minerais primários silicatados

Íon	Fórmula	Energia gasta por unidade (Kg cal/mol)	Total de energia gasta na quebra do mineral (Kg cal/mol)
Nesossilicatos	SiO ₄	3142	78.550
Inossilicatos de cadeia simples	SiO ₃	3131	104.366
Inossilicato de cadeia dupla	SiO _{2,75}	3127	113.823
Filossilicatos	SiO _{2,5}	3123	124.920
Tectossilicatos ⁵	SiO ₂	3110	155.500

Fonte: Keller (1968)

A sílica amorfa, por sua vez, devido ao arranjo estrutural indefinido, geralmente é estável em temperaturas abaixo de 50°C, mas possui a solubilidade uniforme em pH entre 3 e 7; e a taxa de dissolução aumenta com a elevação do pH e da temperatura (MARTINI, 1979; 1984; URBANI, 1986b). Assim, apesar da sílica amorfa ser quimicamente mais resistente ao intemperismo que os carbonatos, são passíveis de dissolução. Isso confere às rochas compostas por minerais de sílica amorfa a possibilidade de desenvolvimento de feições cársticas.

⁵ Esses grupos de minerais silicatados estão relacionados ao arranjo estrutural interno. Alguns exemplos de minerais primários silicatados pertencentes a esses grupos são: olivina (nesossilicato), piroxênio (inossilicato de cadeia simples), anfibólio (inossilicato de cadeia dupla), muscovita (filossilicato), feldspato e quartzo (tectossilicato).

Portanto, a maior proporção dos compostos de sílica presentes em águas naturais não é proveniente da dissolução do quartzo, mas do intemperismo químico dos minerais silicatados, como feldspatos e micas que, normalmente são mais solúveis que a sílica cristalina (YOUNG & YOUNG, 1992; WRAY, 1997b). Neste contexto, devem-se analisar os processos de dissolução da sílica.

2.3. Processos de Solubilização e Formação das Feições Cársticas em Rochas Siliciclásticas

A formação das feições cársticas em rochas siliciclásticas é ocasionada pelo conjunto de processos composto por dissolução da sílica e remobilização mecânica dos grãos alterados.

2.3.1. Dissolução da Sílica

A dissolução, principal processo na carstificação, está relacionada à circulação da água no sistema e ocorre a partir da reação da sílica com a água, por meio da hidrólise, formando o ácido silícico (EQUAÇÃO 2.1). Conforme Martini (1984), a acidez da água envolvida nesta etapa do processo de intemperismo químico, pode ser considerada leve e produz pouca solubilidade.



EQUAÇÃO 2.1 - Hidrólise da sílica

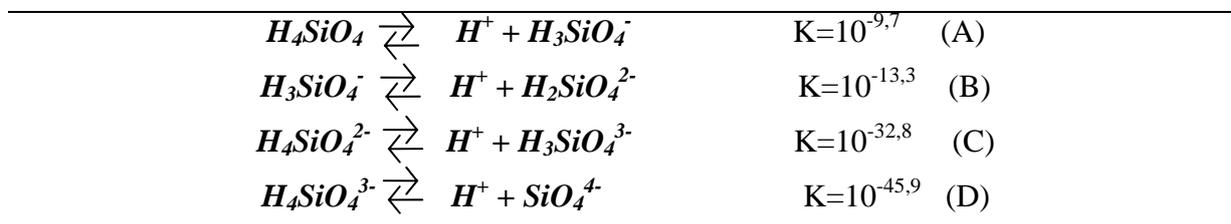
Fontes: Martini, 1984; Urbani, 1986b; Gunn, 2004; Ford e Williams, 2007

Na forma alternativa, $\text{Si}(\text{OH})_4$ aq, o ácido silícico corresponde a quatro grupos de hidroxilas (OH) ao redor de um átomo central de silício (Si). Essa reação é lenta e a solubilidade do quartzo em temperatura ambiente compreende entre 6 e 10mg/l. Em condições ambientais de temperaturas elevadas ou água quente, as reações ocorrem rapidamente e solubiliza, em média, 60mg/l a 100°C (FORD; WILLIAMS, 2007). Entretanto, essa temperatura não ocorre naturalmente na superfície da crosta terrestre.

O ácido silícico (H_4SiO_4) é muito mais fraco que o ácido carbônico⁶ (H_2CO_3); e a sua constante de ionização é mais de mil vezes menor que o carbônico (KRAUSKOPF, 1972).

⁶ Esse ácido é produzido durante o processo de dissolução das rochas carbonáticas.

Em condições alcalinas de pH acima de 9, o ácido silícico passa por quatro etapas de dissociação, liberando moléculas de hidrogênio (H^+) (EQUAÇÃO 2.2).



EQUAÇÃO 2.2 - Dissociação do ácido silícico

Fontes: Martini, 1984; Urbani, 1986b; Gunn, 2004; Ford e Williams, 2007 (A,B). Lindsay (1979); Melo e Perez (2009) (C e D)

A liberação dos íons de H^+ na solução é importante neste processo, porque o poder de dissolução da água é denominado agressividade (SWEETING, 1972). A agressividade da água pode ser mensurada pela concentração de íons H^+ na solução, expressada através do pH.

Em condições de pH acima de 9, a solubilidade da sílica pode ser excedida e sílica amorfa ($SiO_2 \cdot nH_2O$), precipitada. Esse processo é comum em zonas secas de solo. A sílica amorfa ($K = 10^{-2,7}$) solubiliza, em média, 100mg/l em água de pH normal do carste e esse índice pode elevar para, aproximadamente, 300mg/l em água muito alcalina ou quente. Em condições ambientais de água subterrânea supersaturada, a sílica amorfa pode precipitar (FORD; WILLIAMS, 2007). Vale ressaltar que estes valores, resultam de experimentos laboratoriais, mas em condições ambientais, raramente são alcançados.

Martini (1984) mostra que devido à taxa de dissolução da sílica ser baixa⁷, a dissolução pode atuar através de diaclases e intergranularmente, permitindo a transformação das rochas maciças e duras em massas friáveis, porosas e permeáveis. Esse processo é denominado *arenização* (MARTINI, 1979; 1984). Isso, geralmente, ocorre em pequenas quantidades até que a coesão diminua exponencialmente e, assim, permite a atuação do processo de remobilização mecânica. A FIG. 2.1 demonstra a arenização e registra que a água penetra na massa da rocha, preferencialmente ao longo de lineamentos estruturais e planos de acamamento, e permite a dissolução da sílica ao longo das arestas intergranulares. Com isso, a rocha perde ou diminui a consistência e se reduz em areia.

⁷ Devido à resistência do mineral, a taxa de dissolução corresponde a 10^{-17} mols cm^2/s a 25°C (GUNN, 2004).

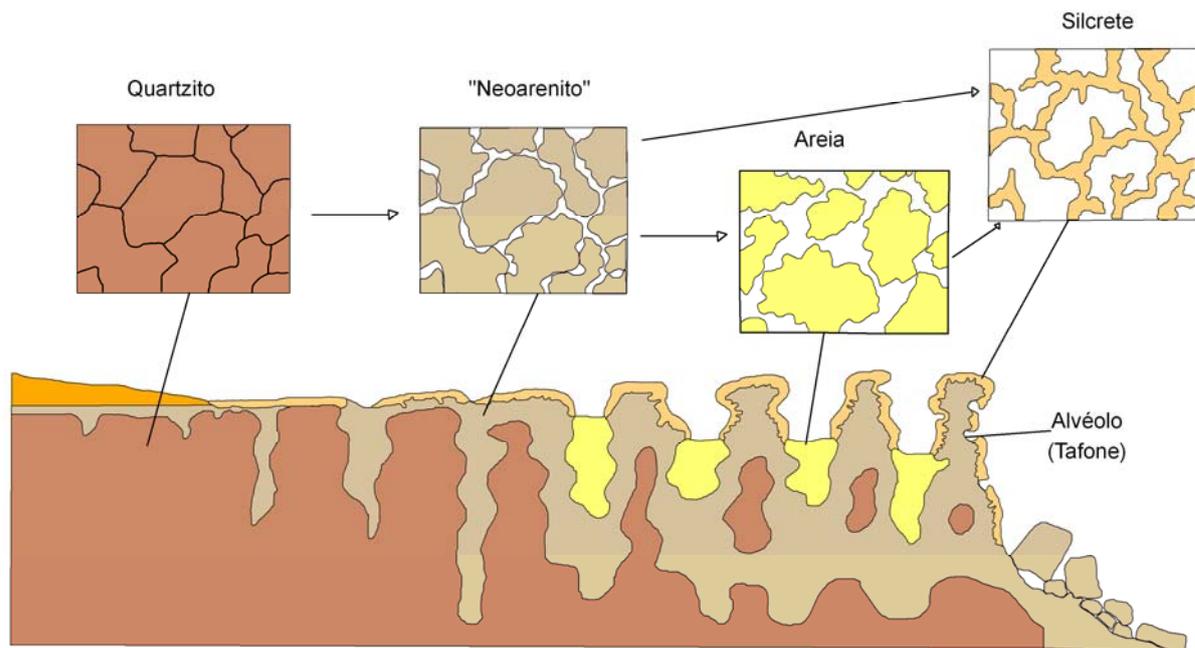


FIGURA 2.1 - Processo de Dissolução da Sílica e Formação de Feições Cársticas⁸
 Fonte: Ford e Williams (2007). Adaptação: Souza, F. C. R. (2012)

O processo de dissolução produz volume significativo de material residual se comparado aos carbonatos. Esse material é remobilizado de modo a produzir canalículos que caracterizam uma rede de drenagem via “*piping*” (JENNINGS, 1985). Entretanto, há pouco conhecimento sobre os mecanismos iniciais desse processo, sendo considerado na literatura científica (MARTINI, 1979; 1984; URBANI, 1986b) como análogos aos processos de *pipes* observados em sedimentos inconsolidados.

2.3.2. Remobilização Mecânica dos Grãos Alterados ou “*Piping*”

Diferentemente do que ocorre em rochas carbonáticas, onde o intemperismo químico é responsável por até 80% da remoção do material durante o processo de carstificação, em rochas siliciclásticas a dissolução é responsável por reduzir o volume de 10 a 20% do material (MARTINI, 1979). Porém, embora os processos mecânicos sejam dominantes no ambiente subterrâneo, a preconização por dissolução é crucial (FORD; WILLIAMS, 2007).

A remobilização mecânica em rochas siliciclásticas, designada “*piping*”, consiste em remover mecanicamente partículas sólidas, resultando na formação de condutos, que podem

⁸ Silcrete é um material silicoso natural formado em zonas de acumulação de sílica. Essa acumulação é produzida por processos físico-químicos superficiais (mudança de pH, por exemplo) e não por processos sedimentares, metamórficos, vulcânicos e plutônicos (SUGUIO, 1998).

evoluir formando galerias subterrâneas. A ocorrência dessa etapa erosiva está associada a dois fatores, que ocorrem de forma integrada: disponibilidade hídrica e alto gradiente hidráulico (MARTINI, 1979; GALÁN, 1991).

Quando a zona arenizada porosa e permeável alcança ou é alcançada por uma superfície aberta (parede das escarpas ou a superfície de vale a uma cota inferior, por exemplo), o processo de formação de condutos (tubificação ou *piping*) começa a atuar. Essa etapa requer alta pressão da água (MARTINI, 1984). A remoção da sílica é eficiente onde a circulação de água é significativa. Caso contrário, a sílica é pouco removida e pode ser reincorporada ao sistema através da formação de clastos (YOUNG *et al.*, 1992). Assim, as cavidades em rochas siliciclásticas ocorrem geralmente em locais de elevado gradiente hidráulico, como borda de falésias, favorecendo o “*piping*”, principalmente se a camada carstificável estiver mergulhando em direção à escarpa (AULER, 2004).

Com o início da etapa de formação de condutos, originam-se galerias em algumas partes do sistema (FIG. 2.2). As galerias podem funcionar inicialmente em condições freáticas, o que facilita a formação dos condutos. Posteriormente, com o aumento das seções (e/ou diminuição a volume de água), o conduto pode passar a condições vadosas. Neste caso, a erosão e os colapsos são fatores importantes para aumentar as dimensões do conduto (URBANI, 1986b).

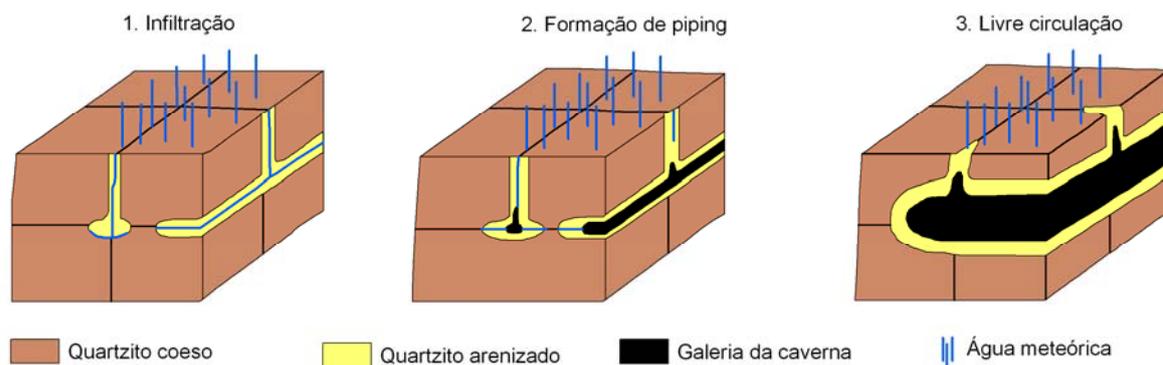


FIGURA 2.2 - Modelo de formação de galerias por arenização e piping
Fonte: Wiegand *et al.* (2004). Adaptação: Souza, F. C. R. (2013)

À medida que os condutos ampliam, os colapsos intensificam e os blocos desprendidos podem ser removidos por intemperismo e erosão. Nesta etapa de crescimento volumétrico das cavidades, podem ocorrer diferentes variações morfológicas internas dependendo dos fatores litológicos, estruturais e hidrológicos locais. Esses fatores explicam a

diversidade de formas geradas, desde cavidades até pequenos sistemas, ou abismos (URBANI, 1986b).

Quando a circulação hídrica diminui significativamente ou acaba, a cavidade deixa de ser ativa. Assim, os processos de dissolução intragranular, formação de condutos e erosão são interrompidos ou atuam de forma reduzida. Com isso, nestas cavidades podem atuar majoritariamente outros processos como colapso ou exfoliação⁹ (URBANI, 1986b). Portanto, o processo de dissolução e formação do relevo cárstico está relacionado a conjunto de fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, orgânicos e inorgânicos.

2.4. Fatores Controladores da Dissolução da Sílica

O processo de dissolução da sílica está associado ao conjunto de fatores composto por: i) estruturação mineralógica da sílica (grau de cristalização ou fase amorfa); ii) potencial hidrogeniônico (pH); iii) temperatura; iv) presença de sais, compostos orgânicos e inorgânicos; v) atividades microbiológicas; vi) alto gradiente hidráulico, entre outras (YARIV; CROSS, 1979).

2.4.1. Rochas Siliciclásticas e Controle Litoestrutural

A rocha exerce influência na elaboração de paisagens cársticas, pois propriedades litológicas e petrográficas estão relacionadas à dissolução. Nesse contexto, o ambiente de deposição determina a pureza, textura, espessura dos pacotes e outras propriedades da rocha, os quais são fatores que devem ser interpretados na análise da geomorfologia cárstica em geral (FORD; WILLIAMS, 2007). No entanto, há poucos estudos sobre a relação desses fatores com o desenvolvimento de feições cársticas em rochas siliciclásticas. O que se sabe é que, ao contrário das rochas carbonáticas que a pureza mineralógica das rochas favorece diretamente a velocidade e intensidade da dissolução (JENNINGS, 1985; WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007), nas rochas siliciclásticas essa relação é inversa. Afinal, quanto maior a concentração de minerais silicatados puros, maior é a resistência da rocha ao intemperismo.

⁹ Este processo ocorre, principalmente, em rochas muito isotrópicas, tornando-se um fator importante de ampliação das galerias (URBANI, 1986b).

Quanto à textura, considera-se que as rochas siliciclásticas são compostas, predominantemente, pela fração grosseira¹⁰. Os grãos menores apresentam maior probabilidade à dissolução, uma vez que, possuem maior área de exposição das superfícies (FORD; WILLIAMS, 2007). Destaca-se que os mecanismos da dissolução¹¹ contribuem para a compreensão da influência desse fator, pois, os íons são liberados mais facilmente nas superfícies, cantos e arestas expostos à atuação da água.

A porosidade primária e secundária da rocha é outro fator que interfere no desenvolvimento de áreas cársticas, devido à variação na natureza, escala e distribuição dos espaços vazios entre os grãos (FORD; WILLIAMS, 2007). A porosidade primária corresponde aos poros intergranulares desenvolvidos antes da diagênese e a secundária refere-se às estruturas representadas por juntas, planos de acamamento, fraturas, falhas e descontinuidades formadas após a diagênese (SWEETING, 1972; DREYBROTD, 1998).

Portanto, a porosidade está relacionada à facilidade de infiltração da água no maciço e circulação da mesma intergranularmente nos poros da rocha. Piló (1998) destaca que onde as falhas estão presentes, é comum encontrar dolinas e paredões alinhados ao longo delas. Wray (1997a) sugere que arenitos com alta porosidade primária desenvolvem formas cársticas notáveis, ao passo que arenitos com baixa porosidade primária são intemperizados de forma mais lenta. Neste contexto, as rochas quartzíticas apresentam porosidade primária inibida em relação aos arenitos, devido ao processo de metamorfismo. Por isso, para esta rocha a porosidade secundária desempenha papel representativo para formação das feições, conforme sustentado por Szczerban *et al.* (1974); Martini (1979); Urbani (1986b); Galán (1991); Wray (1997b).

Wray (1997b) afirma que feições cársticas desenvolvidas em rochas areníticas e quartzíticas possuem gênese relacionada às estruturas da rocha. As cavidades em rochas siliciclásticas, por exemplo, tendem a se desenvolver na borda de escarpas, onde tendem a gerar fraturas abertas (MARTINI, 1979; GALÁN, 1991; WRAY, 1997b).

¹⁰ Para as rochas carbonáticas, Ford e Williams (2007) afirma que a quanto menor o tamanho do grão mineral, maior a rapidez da dissolução da rocha. Mas ratifica que grãos finos na rocha podem ser menos solúveis se o tamanho destes for uniforme, o que dificulta a interconexão entre os espaços vazios. Com isso, Souza (2011) constata que quanto maior a heterogeneidade granulométrica, maior a eficácia da dissolução. Neste caso, para as rochas siliciclásticas que contem, predominantemente, a fração grosseira destaca-se que, embora a heterogeneidade ocorra e seja importante, a primeira hipótese de dissolução quanto ao tamanho do mineral é mais recorrente.

¹¹ Descrito por Martini (1979, 1984) e Urbani (1986b).

2.4.1.1. Estruturação Mineralógica da Sílica

A estruturação mineralógica corresponde à forma do arranjo atômico da sílica e contribui com o grau de resistência da mesma à dissolução. A TAB. 2.3 demonstra a solubilidade de diferentes tipos de sílica a 25°C.

TABELA 2.3
Solubilidade de diferentes formas de sílica

Formas de sílica	Solubilidade a 25°C (ppm)
Quartzo	6
Calcedônia	17
Cristobalita	27
Sílica Gel	115

Fonte: Szczerban *et al.* (1974)

Portanto, entre os tipos mais comuns de sílica existentes na crosta terrestre, a sílica amorfa ou gel apresenta-se como aquela com maior índice de dissolução. Em condições térmicas de 25°C a solubilidade da sílica amorfa é 19,17 vezes superior ao quartzo (TAB. 2.3). Ford e Williams (2007) apresenta as taxas de solubilidade de alguns minerais em condições ambientais de 25°C e pressão atmosférica de 1 bar (105 Pa), além de destacar a faixa de abundância desses minerais em água meteórica e suas reações de dissolução (TAB. 2.4).

TABELA 2.4
Solubilidade de Minerais

Mineral	Reação de Dissolução	Solubilidade (mg/l)	Faixa de abundância em água meteóricas (mg/l)
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}^{3+} + 6\text{OH}^-$	0,001	Traços
Quartzo	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$	12	1-12
Sílica amorfa	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$	120	1-65
Calcita	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	60*, 400#	10-350
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$	50*, 300#	10-300
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	2400	0 – 1500
Silvita	$\text{KCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{K}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	264000	0 – 10000
Mirabilita	$\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	280000	0 – 10000
Halita	$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}^+ + \text{OH}^-$	360000	0 – 10000
* $\text{P}_{\text{CO}_2} = 10^{-3}$ bar			
# $\text{P}_{\text{CO}_2} = 10^{-1}$ bar			

Fonte: Ford e Williams (2007)

Assim, é possível correlacionar a solubilidade da sílica (cristalina e amorfa) com minerais carbonatos (calcita e dolomita) e evaporitos (halita, gipsita e anidrita). Percebe-se que os minerais silicatados são os menos solúveis se comparados aos demais e nessas condições, a sílica amorfa apresenta taxas de solubilidade dez vezes maiores que o quartzo.

White *et al.* (1966) sugerem que o quartzo pode ser intemperizado e transformado em opala, o que facilitaria a dissolução. Porém, a transformação do quartzo em opala não é possível nas condições termodinâmicas da superfície terrestre (MARTINI, 2000).

2.4.2. Precipitação, Temperatura e pH

A água, principal agente do desenvolvimento das áreas cársticas, pode atuar superficial ou subterraneamente e, portanto, as áreas com maior índice de precipitação pluviométrica tendem a formar paisagens cársticas elaboradas em rochas siliciclásticas. Segundo Szczerban *et al.* (1974) a elevação da temperatura promove a aceleração da maioria das reações químicas, resultando em maior índice de dissolução da sílica. A TAB. 2.5 registra a solubilidade dos principais tipos de sílica em temperaturas de 25, 100 e 200°C.

TABELA 2.5

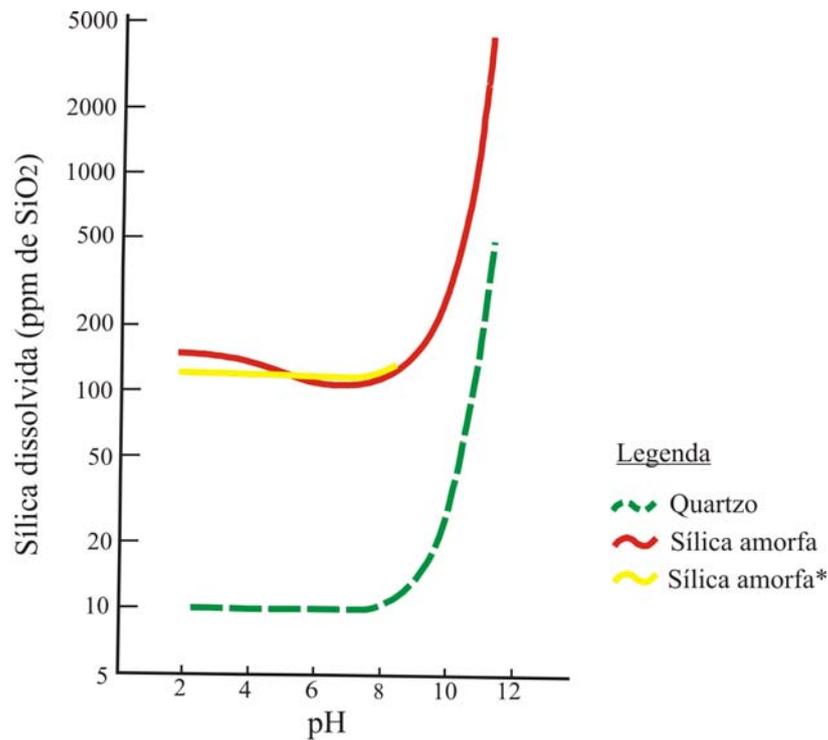
Solubilidade da sílica em diferentes temperaturas

Mineral/ Temp.	Solubilidade (ppm)		
	25°C	100°C	200°C
Quartzo	6	49	268
Cristobalita	17	83	322
Calcedônia	27	125	465
Sílica Gel	115	360	930

Fonte: Szczerban *et al.* (1974)

Percebe-se que temperaturas elevadas favorecem a dissolução, porém isso não significa que necessariamente apenas nas regiões tropicais ocorre desenvolvimento de feições cársticas. Pois, embora haja maior concentração de feições cársticas em rochas siliciclásticas nas regiões tropicais, há registros de existência desse fenômeno em áreas de clima temperado, onde não há evidências de paleoclima tropical (WRAY, 1997b). Wray (1997b) registra, por exemplo, a ocorrência deste fenômeno nas áreas de Sidney. Pontes e Melo (2011) citam ocorrências na região central do Paraná, regiões de clima subtropical, Cfa e Cfb, conforme a classificação de Köppen-Geiger (1948).

A sílica tende a se tornar significativamente solúvel apenas em condições de pH superiores a 9 em condições de 25°C (KRAUSKOPF, 1972) (GRAF. 2.1). Entretanto, essas condições alcalinas raramente são alcançadas em áreas de arenito e quartzito, onde o solo e a água normalmente são levemente ácidos, principalmente em áreas de clima tropical úmido. Além disso, o ácido silícico, produzido durante o processo de carstificação, é uma molécula neutra, sem qualquer ionização considerável em pH das soluções naturais.



* Curva calculada para a sílica amorfa, baseada numa solubilidade, assumida como constante, de 120ppm de SiO₂ para valores de pH abaixo de 8 e para valores de -9,9 para log K₁ para H₄Si₄

GRÁFICO 2.1 - Solubilidade da Sílica em função do pH

Fonte: Krauskopf (1972). Adaptação: Souza, F. C. R. (2012)

O GRAF. 2.2 demonstra a relação de solubilidade entre quartzo e sílica amorfa com o pH e temperatura, e ratifica que o aumento desses indicadores favorecem a solubilidade da sílica amorfa e cristalina. A proporção de sílica amorfa solubilizada é significativamente superior ao quartzo nas mesmas condições ambientais de pH e temperatura (GRAF. 2.1 e 2.2).

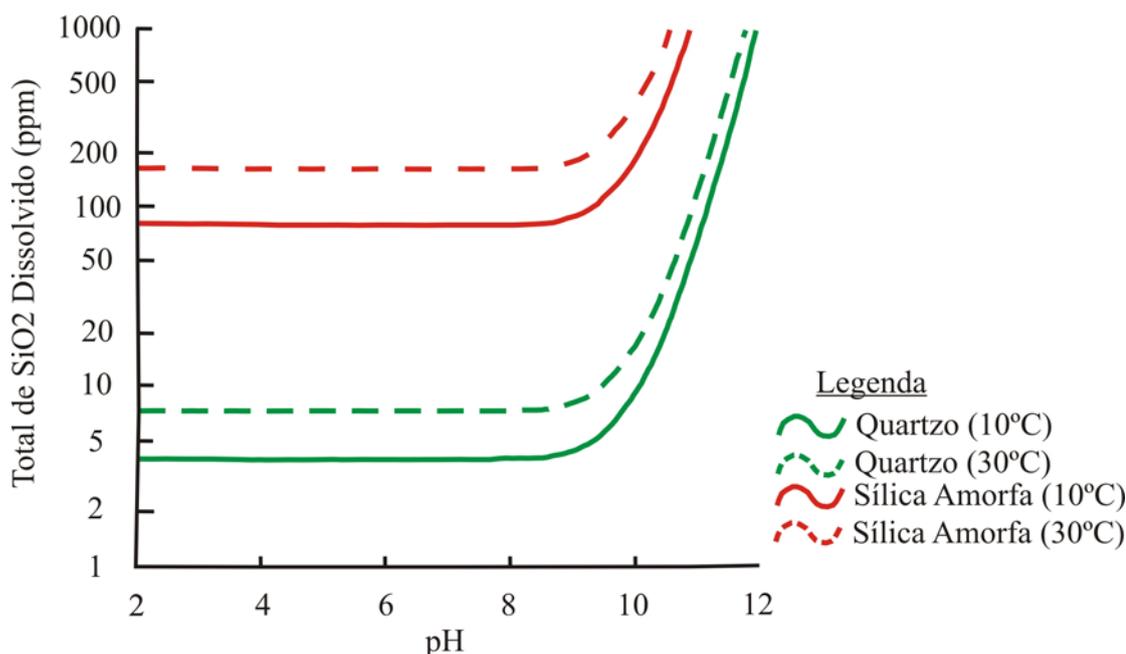


GRÁFICO 2.2 - Efeito do pH e da temperatura na solubilidade do quartzo e da sílica amorfa
 Fonte: Palmer (2009). Adaptação: Souza, F. C. R. (2013)

2.4.3. Sais e Compostos Orgânicos e Inorgânicos

Os estudos sobre a contribuição dos compostos inorgânicos com a solubilidade da sílica são preliminares e requerem aferições aprofundadas. Conforme Younger (1988), a solubilização de óxidos de ferro existentes nas rochas é um fator capaz de catalizar a dissolução da sílica. O autor menciona a hipótese de que a velocidade de dissolução da sílica pode ser acelerada na presença de elevadas concentrações de cloretos.

Icehower *et al.* (2000) destacam que a adição de cloreto de sódio (NaCl) em uma solução, mesmo que em pequenas concentrações, pode acelerar em até 21 vezes as taxas de dissolução da sílica. No entanto, os resultados apresentam valores similares para a sílica amorfa e para o quartzo; com isso os autores inferem que outros solutos presentes na água (potássio, magnésio e cálcio), também podem ser capazes de acelerar a superfície de reatividade da sílica amorfa na dissolução.

A ação de elementos orgânicos que produzem ácidos capazes de solubilizar as rochas siliciclásticas e mobilizar SiO_2 é um aspecto controverso cientificamente. Bennet *et al.* (1998) sugerem que regiões de solos ricos em matéria orgânica e onde há intemperismo intenso, ocorre a formação de complexos sílico-orgânicos e a adição de compostos orgânicos em sistemas aquosos capazes de dissolver a sílica.

Willems *et al.* (1988; 2002) informam a possibilidade de bactérias aeróbicas e anaeróbicas atuarem na dissolução da rocha. Os autores sustentam as afirmações com base na presença de alvéolos no interior de cavidades que não aparentam ter gênese mecânica e da existência de minerais de gênese orgânica, como a taranakita, em espeleotemas no interior de cavernas. Sugere-se que as bactérias exerçam um papel importante na dissolução de algumas rochas siliciclásticas e análises microscópicas revelam a assinatura geoquímica desses microorganismos nos minerais (WILLEMS *et al.*, 1998; 2002). Viles *et al.* (1994) defendem a probabilidade de líquens estarem envolvidos no processo de intemperismo das rochas areníticas e quartzíticas.

No entanto, análises laboratoriais constataram que os ácidos orgânicos não parecem aumentar significativamente a taxa de dissolução da sílica (DREVER *et al.*, 1996). Viers *et al.* (1997) demonstram que o silício não se liga a grandes moléculas orgânicas. Wiegand *et al.* (2004) verificaram, a partir de experimentos laboratoriais, que a presença de ácidos húmicos não aumenta o valor de saturação absoluto em SiO_2 na água, mas acelera a cinética de dissolução, quando presentes em altas concentrações.

Destaca-se que esses fatores são elementos importantes no processo de desenvolvimento das feições cársticas em rochas siliciclásticas. Porém, eles devem ser interpretados no contexto que envolve os aspectos geológicos (controle estrutural, mineralogia), climáticos e geomorfológicos.

2.5. Feições Cársticas

As feições cársticas são os produtos resultantes da dissolução, remobilização mecânica e, em alguns casos, precipitação mineral. Essas feições podem ser classificadas conforme a localização nas superfícies específicas dos ambientes cársticos. Essa classificação sugere a presença de exocarste, epicarste¹² e endocarste.

2.5.1. Feições Superficiais: exocarste

O conjunto de feições cársticas superficiais compõe as áreas morfológicas denominadas exocarste (JENNINGS, 1971; BÖGLI, 1980; FORD; WILLIAMS, 2007). As

¹² O epicarste, ou zona subcutânea, é constituído pela porção superior da rocha subjacente coberta por material pedológico (FORD; WILLIAMS, 2007).

principais formas cársticas superficiais são os karrens, dolinas, uvalas, poljés, maciços, torres, verrugas, arcos, pontes naturais e as feições hidrológicas.

Karren, lapiéz ou lapiás são canaluras de espessura milimétrica a centimétrica, que sulcam a superfície das rochas. As áreas recobertas por lapiesamentos são denominadas campos de lapiás ou *karren fields* (JENNINGS, 1971; BÖGLI, 1980).

A temperatura, regime pluviométrico, composição mineralógica, estrutura, textura, grau de inclinação da rocha e as ações biológicas são fatores que podem condicionar o lapiesamento e as variações tipológicas¹³ dessas feições (SWEETING, 1972). As kamenitzas são bacias fechadas de tamanho centimétrico a métrico, resultantes da dissolução superficial da rocha. Conforme Rodet *et al.* (2009), a kamenitza resulta da erosão periférica da rocha sob a ação do lençol de água superficial. As ocorrências de karrens e kamenitzas em rochas siliciclásticas são comuns, podendo-se destacar no Brasil as seguintes áreas de ocorrência, como o médio vale do Rio Paraíba do Sul (UAGODA, 2006; UAGODA *et al.*, 2011); Parque Estadual do Rio Preto (RODET *et al.*, 2009); Diamantina (SOUZA, 2011) e Chapada dos Guimarães (HARDT, 2011).

As dolinas são consideradas depressões fechadas e afuniladas, com formato circular ou oval, cujo tamanho varia de alguns metros a centenas de metros de profundidade e diâmetro, sendo sempre mais largas do que profundas (JENNINGS, 1971; FORD; WILLIAMS, 2007). As dolinas podem ser classificadas conforme os processos envolvidos no seu desenvolvimento. Os principais tipos de dolinas são: i) de dissolução; ii) colapso ou abatimento; iii) aluvial ou de subsidência e iv) colapso devido ao carste subjacente.

As uvalas são coalescências de duas ou mais dolinas, apresentam fundo irregular com um ou múltiplos pontos de infiltração e podem desenvolver lagoas temporárias no seu interior (WHITE, 1988). As dolinas e uvalas são feições recorrentes em rochas siliciclásticas nas Serras do Ibitipoca, Carrancas e Luminária, localizadas na região sudeste de Minas Gerais (CORRÊA NETO *et al.*, 1995; CORRÊA NETO *et al.*, 1997; CORRÊA NETO, 2000), no Parque Estadual do Rio Preto (RODET *et al.*, 2009), no vale do Rio Paraíba do Sul (UAGODA, 2006; UAGODA *et al.*, 2009), na região de Altinópolis (SP), Campos Gerais (PN), próximo à Serra do Itaqueri (SP), na região da Chapada dos Guimarães (MT) (HARDT, 2011) e nas regiões de Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR) (SALLUN FILHO; KARMANN, 2007) (FIG. 2.3).

¹³ Os karrens podem ser classificados conforme o tamanho, origem ou morfologias desenvolvidas. Entre vários tipos de karrens, destacam-se: os laminares, denteados, planos, em rochedo ou *karrenstein*, em agulhas ou punhais, alveolares, *rillenkarren*, *trittkaren*, entre outros (SWEETING, 1972).



FIGURA 2.3 - Feições cársticas em rochas siliciclásticas. A) Karren no médio vale do Rio Paraíba do Sul (UAGODA, 2006); B) Dolinas no médio vale do Rio Paraíba do Sul (UAGODA, 2006); C) *Kamenitza* em arenitos da Formação Furnas (MASSUQUETO *et al.*, 2011); D) Karrens alveolares (*wall pockets*) em arenitos da Formação Furnas (MELO *et al.*, 2011); E) Uvala próximo à Serra do Itaqueri (HARDT, 2011).

Os poljés, feições típicas de áreas cársticas, são largas depressões fechadas, com comprimentos e larguras que chegam a dezenas de quilômetros. Essa feição é caracterizada por apresentar paredes abruptas, fundo plano rochoso ou recoberto por argila de descalcificação, aluviões ou depósitos lacustres (JENNINGS, 1971). Gams (1978) define três condições básicas para a definição de poljé: a) largo piso horizontal de rocha ou material

inconsolidado; b) bacia fechada com bordas íngremes pelo menos em um lado; c) drenagem tipicamente cárstica. Alguns autores, como Gonçalves (2013) defendem a ocorrência de poljés independentemente das dimensões métricas, mas associadas ao processo de dissolução. Hardt (2011) identificou poljés em rochas siliciclásticas no Mato Grosso.

Segundo Suguio (1999) há tendências entre os geomorfólogos em admitir que a seguinte sequência do “ciclo de evolução cárstica”: as dolinas coalescem formando uvalas e estas, por sua vez, aumentam de tamanho dando origem aos poljés. Entretanto, os poljés, geralmente, não são simplesmente uvalas grandes e complexas, pois podem apresentar algum tipo de controle estrutural.

As verrugas ou banquetas são afloramentos individualizados que possuem de alguns decímetros a um metro de diâmetro e altura. Os maciços são feições rochosas semelhantes a planaltos que podem atingir centenas de metros de extensão. Essas feições apresentam paredões recobertos por lapiás. As torres (FIG. 2.4) são feições rochosas isoladas que se destacam na planície cárstica e apresentam formas altas, arredondadas ou irregulares. Arcos naturais correspondem a torres unidas por massa rochosa original através de estruturas horizontais remanescentes. Quando essas estruturas são cruzadas por um curso hídrico ou se localizam em área de desnível do relevo, recebem a denominação de pontes naturais (JENNINGS, 1971; WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007).



FIGURA 2.4 - Torres em rochas quartzíticas na região de Itambé do Mato Dentro
Fonte: Fabri (2011)

Essas feições exocársticas residuais em rochas siliciclásticas são registradas, na região australiana de Bungle-Bungle (YOUNG, 1992) e no Brasil; como por exemplo, as torres na

região de Itambé do Mato Dentro (FABRI, 2011). Destaca-se a ocorrência de morrotes localizados no oeste do Rio Grande do Sul (ROBAINA *et al.*, 2008); torres, pontes e verrugas no Parque Estadual do Rio Preto (RODET *et al.*, 2009); torres e verrugas inseridos na região de Diamantina (SOUZA, 2011); os cones na região da Serra das Confusões e Serra da Capivara, ambas no Piauí (HARDT, 2011). Na região da reta da Boa Vista, próximo de Diamantina há registros de arcos, que até o momento não foram alvos de estudos científicos.

2.5.1.1. Fluviocarste e Feições Hidrológicas

Cvijic (1960) denomina fluviocarste as áreas que possuem características morfológicas fluviais e cársticas. As principais feições hidrológicas são sumidouros, surgências ou ressurgências e a variedade tipológica de vales, como os secos, cegos, recuados e com paredões abruptos na forma de *canyons*.

Os sumidouros são pontos de absorção do curso fluvial e permitem a infiltração de água superficial para o meio subterrâneo e por isso, são considerados locais de recarga de aquíferos. As surgências ou ressurgências são pontos de exfiltração hídrica, caracterizada pela saída da água do meio subterrâneo para o superficial (FORD; WILLIAMS, 2007).

Os vales secos possuem fluxo hídrico temporário, com presença de água apenas nos períodos chuvosos. As drenagens desses vales fluviocársticos são capturadas para o meio subterrâneo. Os vales cegos são caracterizados pela interrupção abrupta da drenagem superficial diante da presença do sumidouro. Os vales recuados, por sua vez, correspondem a ressurgência da água em superfície após drenar o meio subterrâneo e, portanto, são associados à presença de ressurgências. Por fim, os vales com paredões abruptos na forma de *canyons* estão relacionados ao conjunto de processos de abatimento das camadas de rochas superficiais (WHITE, 1988).

Feições hidrológicas em rochas siliciclásticas são registradas nos trabalhos de Corrêa Neto *et al.* (1995); Corrêa Neto *et al.* (1997); Corrêa Neto (2000); Robaina *et al.* (2008) e Uagoda *et al.* (2011). Em áreas próximas à Vau e ao Acaba Mundo, região de Diamantina, apresentam feições hidrológicas ainda não estudadas cientificamente. Percebe-se que as drenagens são um dos fatores responsáveis pela configuração geomorfológica do carste. As drenagens podem ser autogênicas, ou seja, oriundas nos limites de áreas cársticas; ou alogênicas, que correspondem aos fluxos hídricos originados em áreas não cársticas e infiltram, posteriormente, nos ambientes cársticos.

2.5.2. Feições do Ambiente Subterrâneo: endocarste

Para Bögli (1980), o endocarste corresponde à zona do carste composta pelos condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. Segundo Ford e Williams (2007), o principal aspecto de controle da gênese das cavernas está condicionado à atitude estrutural da rocha e sua relação geográfica entre a área de recarga e de descarga hídrica.

As cavernas são formadas em zonas hidrológicas vadosa, intermediária (ou de oscilação) ou freática (WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2009). A zona vadosa caracteriza-se por apresentar condições de livre circulação de água e, geralmente, é formada por condutos entrincheirados (PALMER, 2009). A formação desta zona está associada à circulação da água ao longo das falhas e fraturas por ação da gravidade, e esse fato condiciona o alargamento das porosidades secundárias.

A zona de oscilação do nível freático equivale àquela onde os condutos apresentam-se alternadamente seco e inundado. A zona freática, por sua vez, é aquela formada abaixo do nível freático, onde todos os vazios estão ocupados por água (WHITE, 1988). Isso ocorre porque com o contínuo aumento do diâmetro dos condutos por processos hidrodinâmicos, a dissolução ocorre em todos os pontos, já que os condutos estão totalmente preenchidos por água. Esses tipos de fluxos podem contribuir para a formação de diversos tipos de cavidades.

2.5.2.1. Cavidades Naturais Subterrâneas

Conforme o Decreto nº6640, de 07 de novembro de 2008, cavidade natural subterrânea corresponde a todo e qualquer espaço natural subterrâneo penetrável pelo homem, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecida como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora existentes e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que a sua formação haja ocorrido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante (BRASIL, 2008). Segundo Termo de Referência do CECAV, em termos de licenciamento ambiental, para definir caverna, foi estabelecido o limite mínimo de 5m de projeção horizontal, quando desenvolvidas em rochas não carbonáticas (AULER; PILÓ, 2011a)¹⁴.

¹⁴ Enfatiza-se que os limites morfométricos estabelecidos no Termo de Referência do CECAV aplicam-se apenas para termos de licenciamento.

A análise espeleogenética, ou seja, o estudo da origem e formação das cavidades¹⁵ possibilita o resgate de informações das condições ambientais de sua formação. Afinal, a espeleogênese envolve a complexa interação entre geologia, química e mecanismos do fluxo hidrodinâmico no meio subterrâneo (PALMER, 2009). Conforme Palmer (2009), as cavidades podem ser classificadas em diferentes tipos conforme a origem e a morfologia. Em relação à origem, as cavidades podem ser denominadas como: a) de dissolução; b) de atividade vulcânica; c) de erosão mecânica; d) de derretimento de gelo ou glacial; e) acumulação de blocos abatidos na base da vertente ou tálus. Algumas cavidades podem se originar a partir de um ou mais processos.

As cavidades podem originar por singênese. Nesse modelo genético, o conduto desenvolve descendentemente, ou seja, da superfície para o meio subterrâneo. Assim, a ação da água no conduto em zona freática, dissolve o teto, a parede e o piso, favorecendo a formação de seções circulares. Com o rebaixamento do nível freático, o topo do conduto passa a ter espaço com ar e a dissolução passa a atuar somente no piso, o que dá origem a um perfil do tipo *canyon* (RENAULT, 1968; AULER; PILÓ, 2011b).

Algumas cavidades também podem se originar da paragênese, modelo espeleogenético criado por Renault (1968). A paragênese corresponde ao processo em que a circulação do fluido corrosivo ocorre do meio subterrâneo para a superfície, a partir da interface entre a rocha e o sedimento que obstrui parcial ou totalmente o conduto. Com isso, ocorre o entalhamento nessa zona de contato e a ampliação do conduto pré-existente de forma ascendente (PALMER, 2009). Segundo Auler e Piló (2011b), na evolução paragenética, o fluxo lento da água permite a acumulação de sedimento no piso. Esse sedimento impermeabiliza a base do conduto, favorecendo que a água dissolva preferencialmente no teto. Ainda quanto à origem, algumas cavidades podem ser classificadas como hipogênicas, uma vez que os agentes ativos na dissolução provem do meio subterrâneo. Esses agentes podem ser o ácido carbônico (H_2CO_3) ou sulfúrico (H_2SO_4)¹⁶. A água ascendente,

¹⁵ A definição mais utilizada internacionalmente para caverna consiste no conceito adotado pela União Internacional de Espeleologia – UIS. Conforme este órgão caverna é uma abertura natural formada em rocha abaixo da superfície do terreno, larga o suficiente para a entrada do homem. Palmer (2009) ao apresentar a diferença entre caverna e cavidade (*cavern and cave*) estabelece que caverna implica grandeza, podem se referir apenas para áreas subterrâneas naturais com salões largos ou condutos e corredores espaçosos. Porém, o autor não menciona as dimensões quantitativas dessas grandezas. Além disso, para este trabalho, está sendo considerada a definição da Legislação Brasileira.

¹⁶ O ácido sulfúrico pode ser produzido a partir do gás H_2S , que ascende pela rocha e reage com a água subterrânea, formando esse ácido, que dissolve a rocha. O H_2S pode ocorrer em bacias de hidrocarbonetos ou em áreas com oxidação de lentes de pirita.

normalmente aquecida, pode ser carregada desses ácidos e, por isso, essas cavidades são denominadas cavidades hidrotermais (PALMER, 2009).

As cavidades hipogênicas são formadas no ambiente subterrâneo e são caracterizadas por apresentar: entradas com abatimentos; ausência de sedimentos fluviais; mineralogia distinta nos espeleotemas; pode apresentar cúpulas e formas de forte intemperismo e, por fim, nem sempre essas cavidades possuem entrada na superfície (PALMER, 2009; AULER e PILÓ, 2011b). Existem, também, as cavidades originadas por ação biológica de animais gigantes existentes durante o Pleistoceno (como por exemplo, os tatus gigantes) e essas cavidades são denominadas paleotocas (BUCHMANN *et al.*, 2009).

A classificação das cavidades conforme o critério morfológico foi definido por Palmer (2009). A forma como a água infiltra no maciço pode condicionar a formação de cavidades morfolologicamente diferentes e com diferentes tipos de fluxo hídrico. O fluxo vadoso possibilita a formação de galerias com padrões diversificados, predominantemente verticalizadas, onde o fluxo é conduzido pela gravidade, o que origina formas retangulares e abismos. Já no fluxo freático, a água flui sob pressão, produzindo formas elípticas ou circulares (PILÓ, 1998; AULER; PILÓ, 2011b).

A interconexão entre os condutos subterrâneos gera os padrões morfológicos das cavidades. Esses padrões planimétricos registram aspectos que contribuem para a interpretação dos processos e etapas morfogenéticas e, dessa forma, consiste em um aspecto morfológico de classificação das cavidades. Entretanto, uma cavidade pode apresentar segmentos com padrões planimétricos diferentes.

Em áreas de rochas siliciclásticas há registros de desenvolvimento de cavidades na Chapada Diamantina (BA), nos platôs quartzíticos do noroeste da Amazônia brasileira e na Serra do Araçá (AM), onde se encontra a cavidade com maior desnível em rochas quartzíticas do Brasil e do mundo: o Abismo Guy Collet, com 670m de desnível (AULER; PILÓ, 2011a). Em Minas Gerais foram identificadas cavidades na região de Diamantina (BRICHTA *et al.*, 1980; WILLEMS *et al.*, 2008; AZEVEDO; ARAÚJO, 2011; STÁVALE, 2012), no município de São Tomé das Letras (KARMANN *et al.*, 1979), na região de Itambé do Mato Dentro (FABRI, 2011), no Parque Estadual do Rio Preto (RODET *et al.*, 2009) e nas Serras do Ibitipoca, Carrancas e Luminárias no sudeste do estado (CORRÊA NETO, 2000; SILVA, 2004). Além disso, no Pico do Inficionado (MG) localizam-se três das cavidades que estão entre as mais profundas do Brasil em rochas quartzíticas até então conhecidas. Essas cavidades são a Gruta do Centenário (484m de desnível e 3800m de extensão horizontal); a Gruta da Bocaina (404m de desnível) e a Gruta Alaouf (294m de desnível) e correspondem,

respectivamente, à segunda, terceira e quarta cavidade mais profunda do país (AULER; PILÓ, 2011a).

Além disso, destacam-se as cavidades em rochas areníticas no Tocantins (MORAIS, 2009); na Chapada dos Guimarães (HARDT *et al.*, 2009; HARDT, 2011); na região paulistana de São Carlos, Analândia, Rio Claro e São Pedro; no Paraná; no interior do Piauí, por exemplo no município de São Raimundo Nonato (KARMANN *et al.*, 1979; AULER; PILÓ, 2011a); nos municípios cearenses de Viçosa do Ceará e Tianguá (KARMANN *et al.*, 1979) e no Pará (TRAVASSOS *et al.*, 2012) (FIG. 2.5).



FIGURA 2.5 - Exemplo de cavidade natural em rochas quartzíticas no Parque Estadual do Rio Preto.

Fonte: Rodet *et al.* (2009)

2.5.2.2. Depósitos Químicos, Clásticos e Orgânicos

No interior das cavidades ocorre a deposição de materiais sedimentares, químicos, clásticos e orgânicos. Esses depósitos endocársticos se dividem em autóctones (gerados no

interior da cavidade) ou alóctones¹⁷ (originados em áreas externa e transportados para o ambiente subterrâneo através da água ou da gravidade). Os autóctones correspondem às precipitações químicas, resíduos insolúveis das rochas¹⁸ e blocos abatidos originados a partir do colapso do teto e paredes de condutos. Os depósitos alóctones são representados por sedimentos. Os depósitos orgânicos de origem animal ou vegetal podem ser autóctones ou alóctones e são fontes de alimentação para a fauna cavernícola (AULER; ZOGBI, 2005) ou são resíduos da decomposição ou excreção de animais.

Os depósitos químicos ou espeleotemas correspondem a deposições minerais que se formam, basicamente, por processos químicos e podem ser encontrados em cavidades naturais subterrâneas, conforme definição da Portaria nº 887/1990, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis (IBAMA, 1990). Portanto, os espeleotemas consistem em materiais que resultam da dissolução, precipitação e cristalização dos minerais.

A variedade das formas, colorações, textura, resistência, distribuição e tamanho dos espeleotemas estão relacionados à composição mineral e ao grau de impureza contida na rocha ou na solução aquosa (WILLEMS *et al.*, 2008; LINO, 2009; PALMER, 2009). As características dos espeleotemas variam conforme as propriedades da rocha encaixante, a velocidade, pressão e pH da água, as condições atmosféricas e térmicas, a disponibilidade de CO₂, a quantidade de matéria orgânica, bactérias, algas e microorganismos existentes no ambiente; ou seja, trata-se de um processo correlacionado a diversos fatores.

Os mecanismos de deposição (gotejamento, escorrimento linear, escorrimento laminar, borrifamento, exsudação ou precipitação em meio líquido) e o índice de inclinação do teto da cavidade contribuem e interferem no formato físico dos espeleotemas (LINO, 2009). As estalactites, estalagmites, colunas, cortinas, escorrimentos, travertinos, pérolas, couves-flor e helictites são os principais tipos de espeleotemas encontrados nas cavidades naturais subterrâneas. Em cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas a variedade e tamanho dos espeleotemas são maiores se comparados aos desenvolvidos em rochas quartzíticas devido, principalmente, ao índice de solubilidade das rochas.

Os espeleotemas desenvolvidos em rochas siliciclásticas mais comuns são os coralóides (FIG. 2.6), apesar da possibilidade de ocorrência de outros tipos. Neste tipo de rocha a precipitação do mineral ocorre apenas acompanhada de evaporação e não ocorre

¹⁷ Em áreas endocársticas, os sedimentos autóctones e alóctones se misturam pela ação, principalmente, da água, que possui comportamento específico em ambiente confinado.

¹⁸ Em cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas utiliza-se a expressão “argilas de descalcificação”. Em cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas, o volume de material sedimentar detrítico autóctone é maior se comparado às áreas carbonáticas.

liberação de gás, diferentemente dos espeleotemas de calcita. A força da gravidade e os processos de capilaridade atraem pequenos volumes de água para a superfície da rocha e evapora, depositando finas camadas de sílica amorfa. A sucessão de ciclos de evaporação e deposição possibilita o desenvolvimento dos espeleotemas (WRAY, 1997b). Espeleotemas em rochas siliciclásticas foram descritos nos trabalhos de Romani *et al.* (2005), Hardt (2011), Fabri (2011) e Souza (2011).

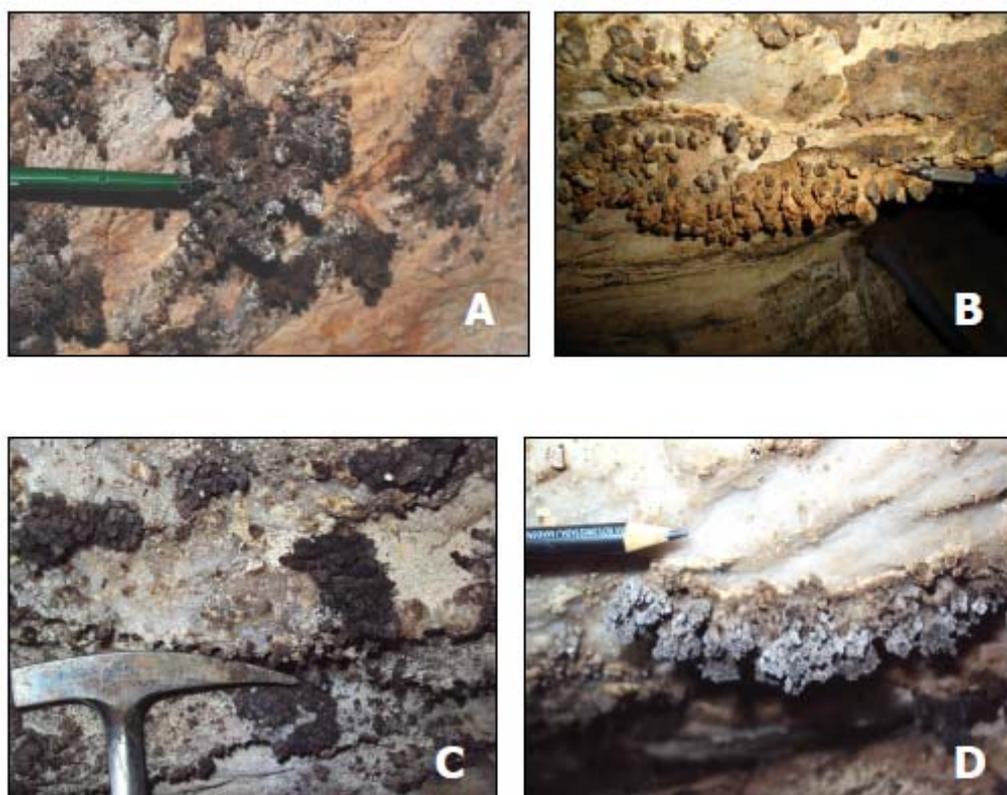


FIGURA 2.6 - Espeleotemas desenvolvidos em rochas siliciclásticas na região de Itambé do Mato Dentro. A, B, C, C: Coralóides.
Fonte: Fabri (2011)

Os depósitos sedimentares dentríticos ativos ou os clásticos consistem em material granular produzidos pelo intemperismo da rocha, transporte e deposição. O tamanho, a composição e a estrutura interna dos sedimentos possuem informações sobre a fonte e a característica do fluxo de água que o depositou. Os sedimentos podem ser transportados por mecanismos de arraste ou suspensão. As características do depósito sedimentar são controladas por três variáveis que devem ser analisadas: fonte natural de sedimentos, transporte mecânico e ambiente deposicional (PALMER, 2009).

A composição dos depósitos dentríticos é formada, principalmente, por argila, silte, areia e cascalho. As estruturas sedimentares refletem a natureza do fluxo de água responsável

pelo transporte e deposição do material, bem como as condições ambientais do passado. As cavidades, geralmente, apresentam estratigrafia invertida¹⁹ e os principais tipos de estruturas sedimentares podem ser: estratificações cruzadas, marcas de ondas (*ripple marks*), *cut-and-fill*, funis de argila (*mud funnels*), fraturas de argila (*mud cracks*), estalagmites de argila (*mud stalagmites*) e vermiculações²⁰ (PALMER, 2009). Em cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas são identificados sedimentos inconsolidados e blocos abatidos, mas é um assunto pouco discutido até o momento neste tipo de rocha, embora Fabri (2011) destaque a presença de sedimentos na região de Itambé do Mato Dentro.

Os depósitos orgânicos podem ser transportados por água ou vento e também podem ser originados a partir da decomposição de animais externos que caem acidentalmente ou ficam perdidos na cavidade. Além disso, alguns depósitos orgânicos resultam de ação antrópica pré-histórica. Segundo Palmer (2009), os principais tipos de depósitos orgânicos são guanos, resíduos de plantas (troncos, cascas, raízes e pólenes) e resíduos animais (fósseis de vertebrados).

Alguns depósitos são de origem biológica (formados a partir da ação de organismos animais e vegetais); erosiva e deposicional ou resultantes desses dois processos simultaneamente. O salitre, por exemplo, origina-se da ação de bactérias *Nitrobacter* ou *Nitrosomonas* em depósitos de cavernas, que geralmente estão associadas ao guano. Isso resulta na formação de nitrocalcita [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] ou nitrato de cálcio, que para o fabrico da pólvora deve ser transformado em nitrato de potássio (KNO_3) (LINO, 2009).

¹⁹ Em áreas fluviais superficiais, os depósitos estratigráficos, geralmente, são compostos por sucessão de deposições em que a camada superior é geologicamente sempre mais nova que o extrato inferior. Porém, em áreas subterrâneas, devido à hidrodinâmica destes ambientes, a camada superior pode ser mais antiga que a inferior.

²⁰ Vermiculações (*vermiculations*) são depósitos de materiais argilosos e/ou orgânicos em paredes das cavidades que registram a presença de vermes, minhocas ou padrões poligonais. As demais formas de deposição não foram explicadas detalhadamente, pois apresentam a mesma morfologia dos depósitos fluviais em áreas superficiais (exceto as estalagmites de argila podem ocorrer apenas em áreas subterrâneas).

3. CARACTERIZAÇÃO FISIOGRAFICA DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se a SE da sede municipal de Diamantina/MG (FIG. 3.1), abrange o Distrito de Extração e suas proximidades, possui área de 22,71km², perímetro de 19,08km e está fora dos limites de unidades de conservação.

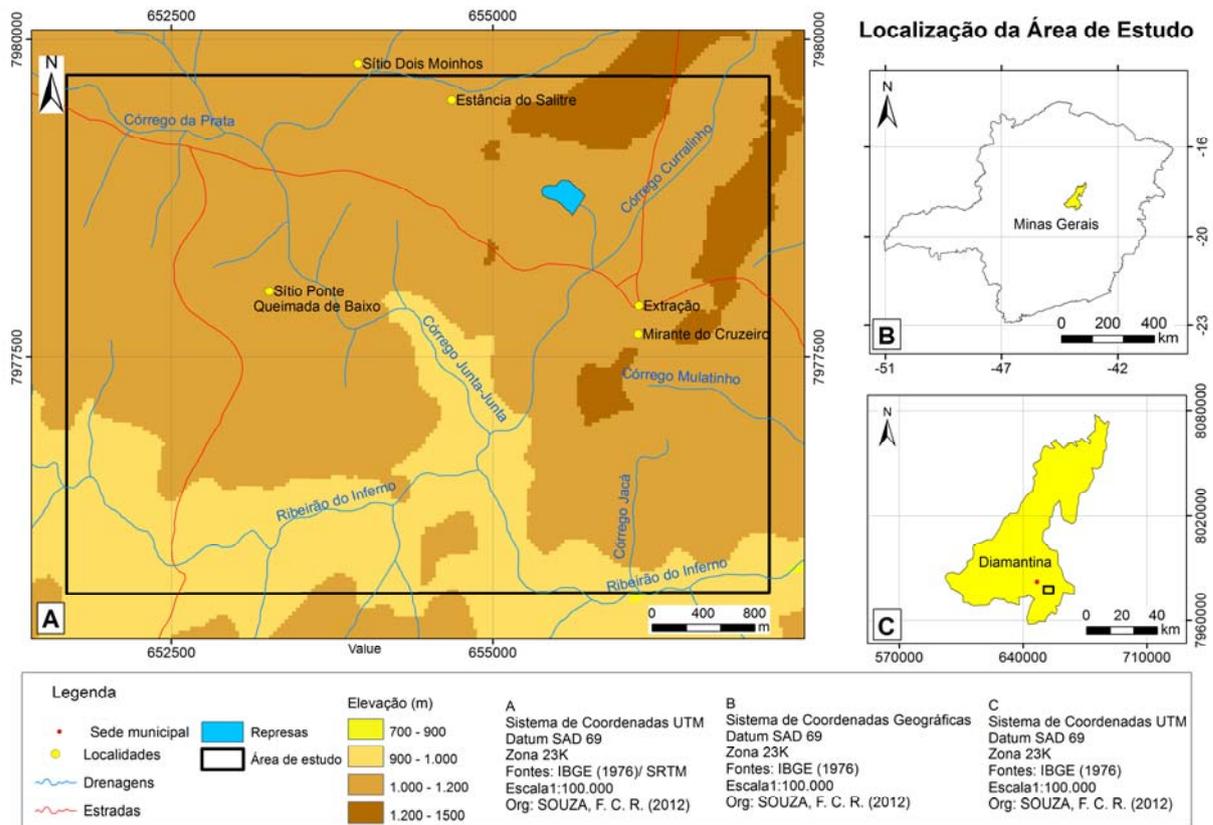


FIGURA 3.1 - Localização da área de estudo

3.2. Contexto Geológico

3.2.1. Geologia Regional

A área de estudo faz parte, geologicamente, do Supergrupo Espinhaço, Grupo Guinda, Formação Sopa-Brumadinho, Membro Caldeirões. O Supergrupo Espinhaço representa o principal conjunto litoestratigráfico, em termos de volume e expressão orográfica da Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) (FIG. 3.2). Essa unidade geológica (Paleo-Mesoproterozóico), predominantemente metassedimentar, é composta, principalmente, por quartzitos e, subordinadamente, por metassiltitos, metaconglomerados, filitos e metavulcanitos (ALMEIDA ABREU; PFLUG, 1994).

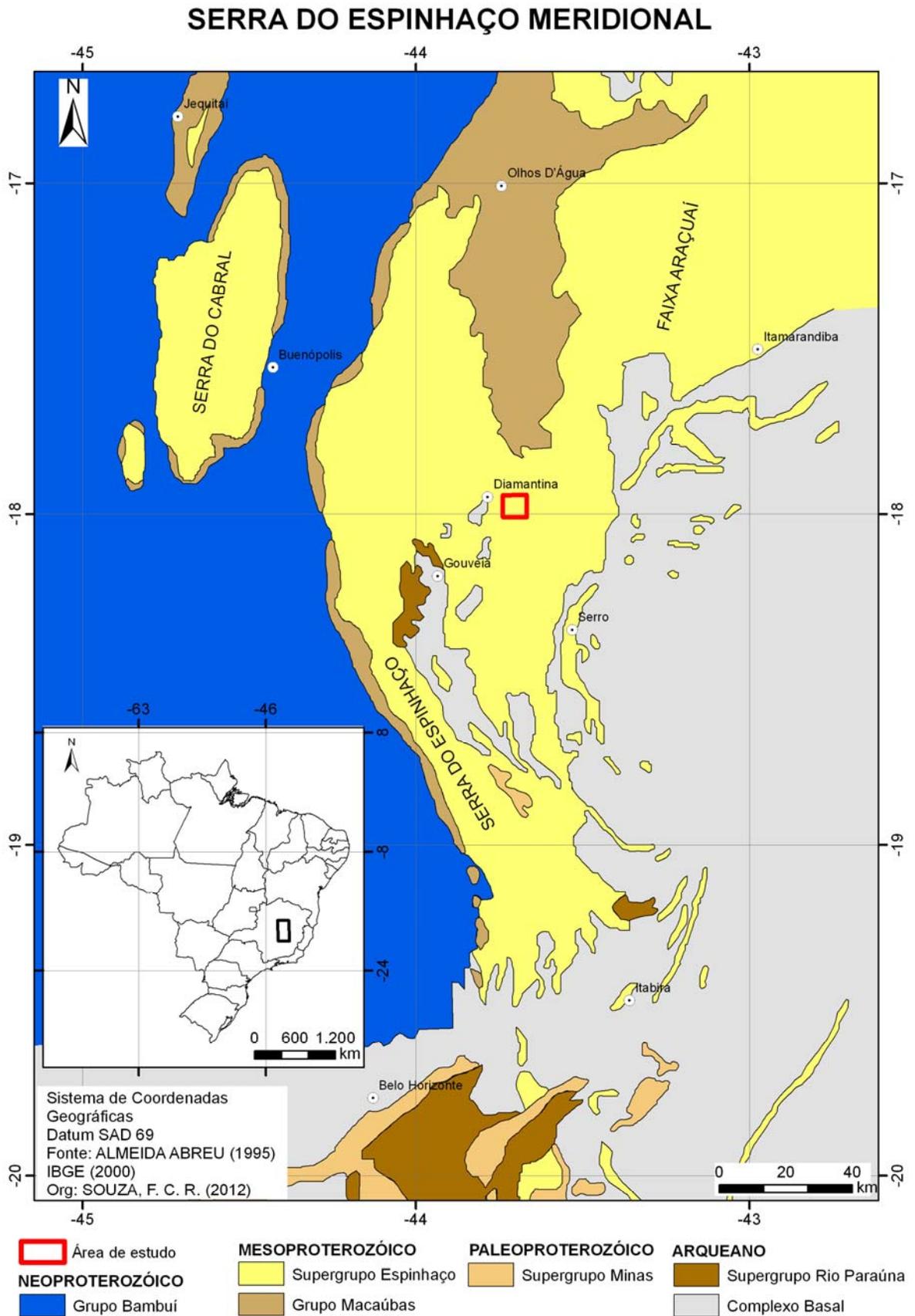


FIGURA 3.2 - Serra do Espinhaço Meridional (SdEM)
Fonte: Almeida Abreu (1995). Adaptação: Souza, F. C. R. (2012)

O Supergrupo Espinhaço é composto, da base para o topo, pelo Grupo Guinda²¹ (Formações Bandeirinha, São João da Chapada, Sopa Brumadinho, Galho do Miguel) e Grupo Conselheiro Mata (Formações Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego da Bandeira, Córrego Pereira e Rio Pardo Grande) (ALMEIDA ABREU, 1993) (QUADRO 3.1).

O Grupo Guinda agrega rochas derivadas de sequências de sedimentos de origem continental, com metavulcanitos intercalados, relacionados à fase *rifte* da Bacia Espinhaço. Os ambientes responsáveis pela acumulação de depósitos do Grupo Guinda foram, sobretudo, fluviais e marinhos costeiros (leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados). O Grupo Conselheiro Mata é representado por rochas originadas por sedimentos de origem marinha costeira, sob influência de marés, com alguma contribuição de sedimentos de origem continental (ALMEIDA ABREU, 1993; ALMEIDA ABREU; PFLUG, 1994; ALMEIDA ABREU, 1995; FOGAÇA, 1997) (QUADRO 3.1).

QUADRO 3.1
Estratigrafia do Supergrupo Espinhaço

	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	ESPESSURA (m)
Supergrupo Espinhaço	Conselheiro Mata	Rio Pardo Grande	Pelitos, arenitos, localmente carbonatos	60 - 1000 ?
		Córrego Pereira	Arenitos (puros, micáceos ou feldspático), localmente pelitos.	~ 250
		Córrego da Bandeira	Pelitos e arenitos	100 - 200
		Córrego Borges	Arenitos (puros, micáceos), localmente brecha/conglomerados quartzíticos.	- 100
		Santa Rita	Pelitos, subordinadamente arenitos	100 - 250
	Guinda	Galho do Miguel	Arenitos, localmente leitos pelíticos	500 - 3000 ?
		Sopa Brumadinho	Pelitos, arenitos, xistos verdes, filitos, diamictitos	0 - 250
		São João da Chapada	Arenitos (médios a grosseiros, puros ou micáceos), filitos hematíticos, conglomerados/ brecha basal	0 - 300
		Bandeirinha	Arenitos puros ou micáceos (incluindo <i>red beds</i>), conglomerados (subordinado), localmente brechas e pelitos	0 - 200

Fonte: Almeida Abreu e Pflug (1994). Adaptação: Souza, F. C. R. (2012)

²¹ A estratigrafia do Supergrupo Espinhaço não está em consenso, autores como Dussin *et al.* (1984) dividem o Supergrupo Espinhaço em dois grupos: Grupo Diamantina (Formações São João da Chapada, Formação Sopa-Brumadinho e Formação Galho do Miguel) e Grupo Conselheiro Mata (Formações Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego da Bandeira, Córrego Pereira e Rio Pardo Grande). Knauer (1990) sugere uma divisão em três conjuntos: Grupo Guinda, Formação Galho do Miguel e Grupo Conselheiro Mata. Fogaça (1997) considera a existência dos Grupos Guinda e Conselheiro Mata como as unidades estratigráficas do Supergrupo Espinhaço. Almeida Abreu (1993), por sua vez, inclui a Formação Bandeirinha na base no Grupo Guinda. Para o presente trabalho utiliza-se a definição de Almeida Abreu (1993).

A Formação Sopa-Brumadinho, principal unidade geológica do Supergrupo Espinhaço em termos econômicos e de expressão espacial, é composta pelos Membros Datas, Caldeirões e Campo Sampaio (QUADRO 3.2).

QUADRO 3.2
Estratigrafia da Formação Sopa-Brumadinho

	Membro	Fáceis	Litologia	Espessura
Formação Sopa Brumadinho	Campo Sampaio	Lacustre Superior	Principalmente pelitos (localmente com níveis ricos em turmalina) arenitos (micáceos ou não), diamictitos (em leitos ou preenchendo paleocanais), filitos hematíticos e vulcânicas básicas.	0 – 60
	Caldeirões	Aluvial/leques	Arenitos (puros, micáceos ou ferruginosos), arenitos conglomeráticos, conglomerados poli ou monomíticos geralmente suportados pelos seixos, filitos hematíticos e xistos verdes.	50 – 150
	Datas	Lacustre inferior	Principalmente pelitos, subordinamente arenitos, localmente xistos verdes e/ou filitos hematíticos	0 – 100 ?

Fonte: Almeida Abreu (1995)

Apesar de divergências quanto ao período geológico, processos de formação e divisão estratigráfica do Supergrupo Espinhaço, Almeida Abreu (1995) e Almeida Abreu e Renger (2002) ressaltam que a formação e evolução do Supergrupo Espinhaço estiveram relacionadas aos processos de rifteamento, formação da bacia de sedimentação marinha e o orógeno. O processo de rifteamento foi composto por três fases. A primeira fase ocorreu em média a 1,7 Ga, em que os domínios continentais sofreram diversos processos de distensão crustal e iniciou-se a fragmentação do supercontinente amalgamado entre 2,1 a 1,8 Ga (ALMEIDA ABREU, 1995). Os registros sedimentares/ vulcânicos dessa fase de rifteamento, marcada por vulcanismos (FIG. 3.3 A), são representados pelos metassedimentos da Formação Bandeirinha. Os sedimentos dessa Formação foram depositados em ambientes fluviais com contribuição eólica e de leques aluviais. A segunda fase do Rife Espinhaço permitiu uma breve relaxação termal da crosta, instalando-se então uma larga e extensa bacia fluvial onde foi depositada a Formação São João da Chapada. Nesta fase, a atividade tectônica praticamente inexistiu. A terceira e última fase (1711 ~ 1700 a 1650 Ma), por sua vez, é marcada pela deposição das Formações Sopa-Brumadinho e Galho do Miguel e intensa atividade crustal, representada por depósitos de ruditos da Formação Sopa-Brumadinho e pelas complexas relações com fácies lacustres, pelíticas e areníticas desta formação (ALMEIDA ABREU, 1993).

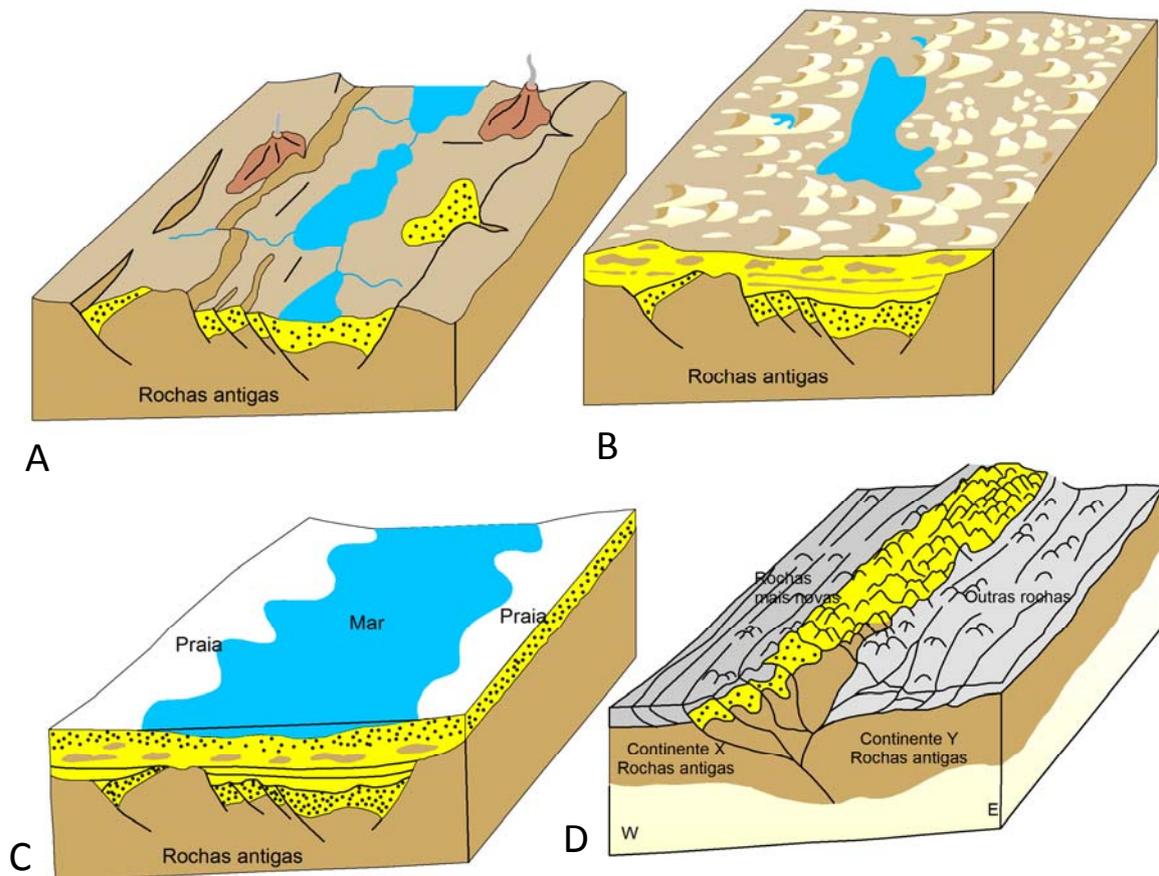


FIGURA 3.3 - Blocos diagrama de representação da formação e desenvolvimento do Supergrupo Espinhaço. **A:** Instalação do rifte; **B:** campos de dunas com desenvolvimento de lagos; **C:** desenvolvimento da bacia marinha oceânica; **D:** formação da cadeia montanhosa em função da convergência de placas tectônicas.

Fonte: Sociedade Brasileira de Geologia (SBG, 2007)

Ocorreram, na terceira fase do rifteamento, conjuntos de deformações extensionais que progrediram sucessivamente para leste, causando, entre outras conseqüências, a formação de meigraben, onde calhas abandonadas pela deformação foram sendo progressivamente assoreadas pelas fácies da Formação Galho do Miguel (ALMEIDA ABREU, 1995). Instalou-se o sistema de dunas (FIG. 3.3 B) e ambiente árido (CHULA *et al.*, 1995).

Posteriormente, o manto litosférico foi exposto à superfície determinando a instalação de bacia marinho-oceânica (FIG. 3.3 C) de margens passivas mesocenozóicas. Esse período foi marcado: 1) por transgressão marinha levando a zona costeira da margem passiva Espinhaço para os domínios ocidentais da atual SdEM, ou seja, esta foi transferida, aproximadamente, 80km para oeste; 2) pela deposição das Formações do Grupo Conselheiro Mata, representado por pacote de sedimentos clásticos, com alternância de pelitos e arenitos, localmente com lentes de dolomitos, de origem marinhas costeiras e plataformais (ALMEIDA ABREU, 1995).

Entre 1,5 e 1,2 Ga (TEIXEIRA *et al.*, 1990, CORDANI *et al.*, 1992), devido ciclos orogênicos maiores ou pela colisão de placas litosféricas, ocorre o processo orogênico Espinhaço (Fig. 3.3 D), que causou: 1) a estruturação da Serra do Espinhaço; 2) a deformação, conseqüentemente, formação de dobras abertas de direção N-S e o metamorfismo; 3) o lineamento mineral perpendicular às estruturas tectônicas, segundo o *trend* longitudinal N-S; 4) transporte de massa para W e lineação de estiramento sobre os planos de foliação caindo para E (ALMEIDA ABREU, 1993).

No Neoproterozóico (900 Ma) evento magmático de caráter básico de impôs, condicionando a intrusão de rochas metabásicas, cortando unidades do Supergrupo Espinhaço (DUSSIN; DUSSIN, 1995). No final do Neoproterozóico, a SdEM recebeu influência do Ciclo Brasileiro, que é registrado, por exemplo: i) pelo aquecimento termal pronunciado em rochas cristalinas; ii) deformação de domínios da SdEM. As partes noroeste e oeste desta serra foram pouco afetadas, mas no domínio centro-sul, as rochas do Supergrupo Espinhaço foram cavalgadas sobre as unidades dos Grupos Macaúbas e Bambuí. Outro elemento de referência na caracterização do Ciclo Brasileiro é a Faixa Araçuaí. Como a deformação imposta pelo Brasileiro foi em decorrência de atividade tectônica indireta, a geometria e compartimentação da deformação imposta por este evento obedeceu a mesma organização do tectonismo que edificou a Serra do Espinhaço no Mesoproterozóico (ALMEIDA ABREU, 1993; ALMEIDA ABREU, 1995).

3.2.2. Geologia Local

A área pesquisada é composta pelas unidades geológicas da Formação Sopa-Brumadinho, rochas metabásicas e depósitos do Terciário e Quaternário (FIG. 3.4). A Formação Sopa-Brumadinho é constituída pelos Membros Datas (ambiente lacustre inferior), Caldeirões (aluvial/leques) e Campo Sampaio (lacustre superior)²² (ALMEIDA ABREU; PFLUG, 1994).

²² Estes Membros foram anteriormente designados por Schöll e Fogaça (1979), respectivamente, como Níveis D, E e F.

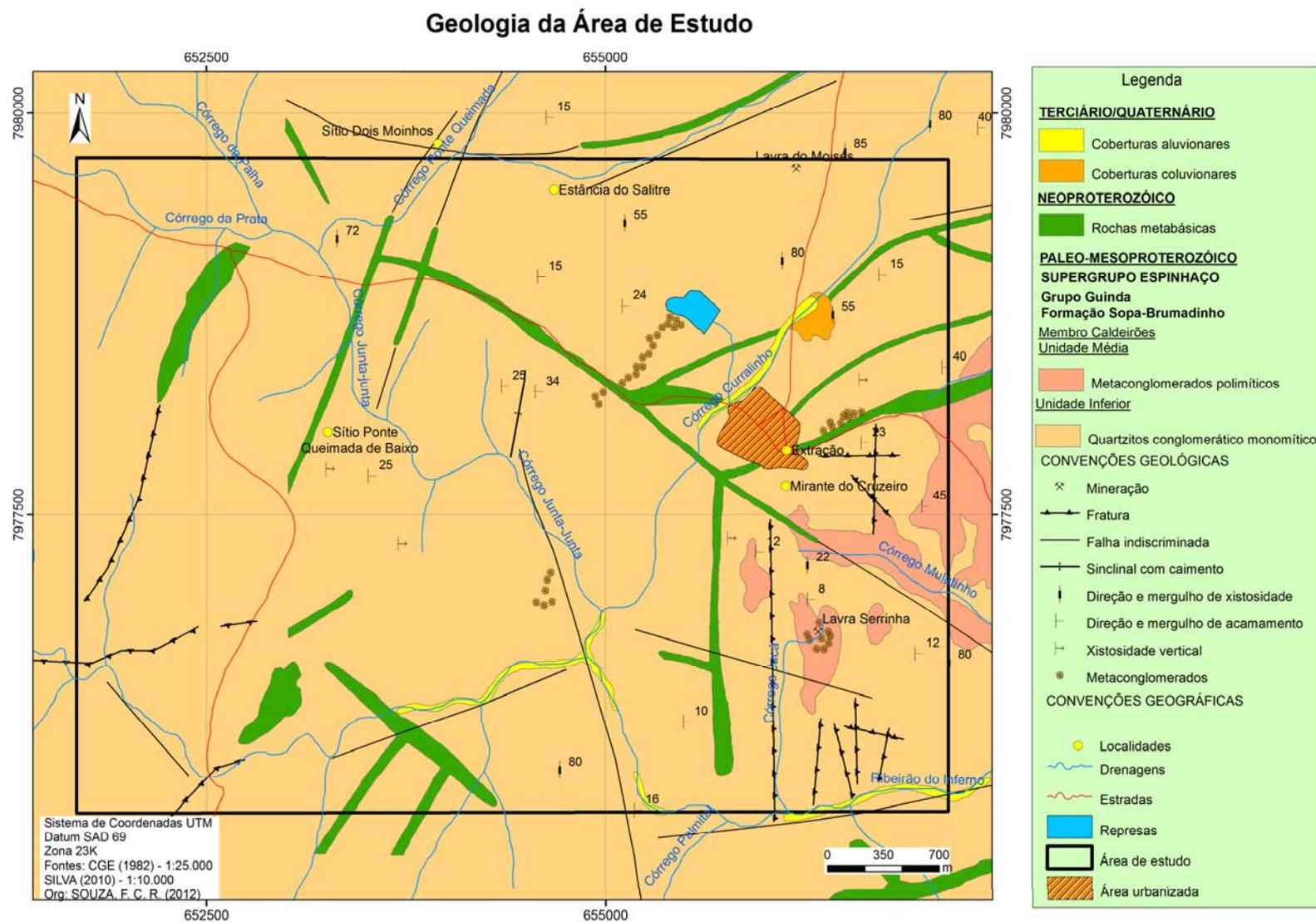


FIGURA 3.4 - Geologia da área de estudo

A Formação Sopa-Brumadinho apresenta estratificações cruzadas de pequeno porte, é composta por quartzitos de granulação grosseira, filitos e metaconglomerados depositados no período de instabilidade tectônica. Na área de estudo essa Formação é representada pelas Unidades Inferior e Média do Membro Caldeirões (FIG. 3.5).

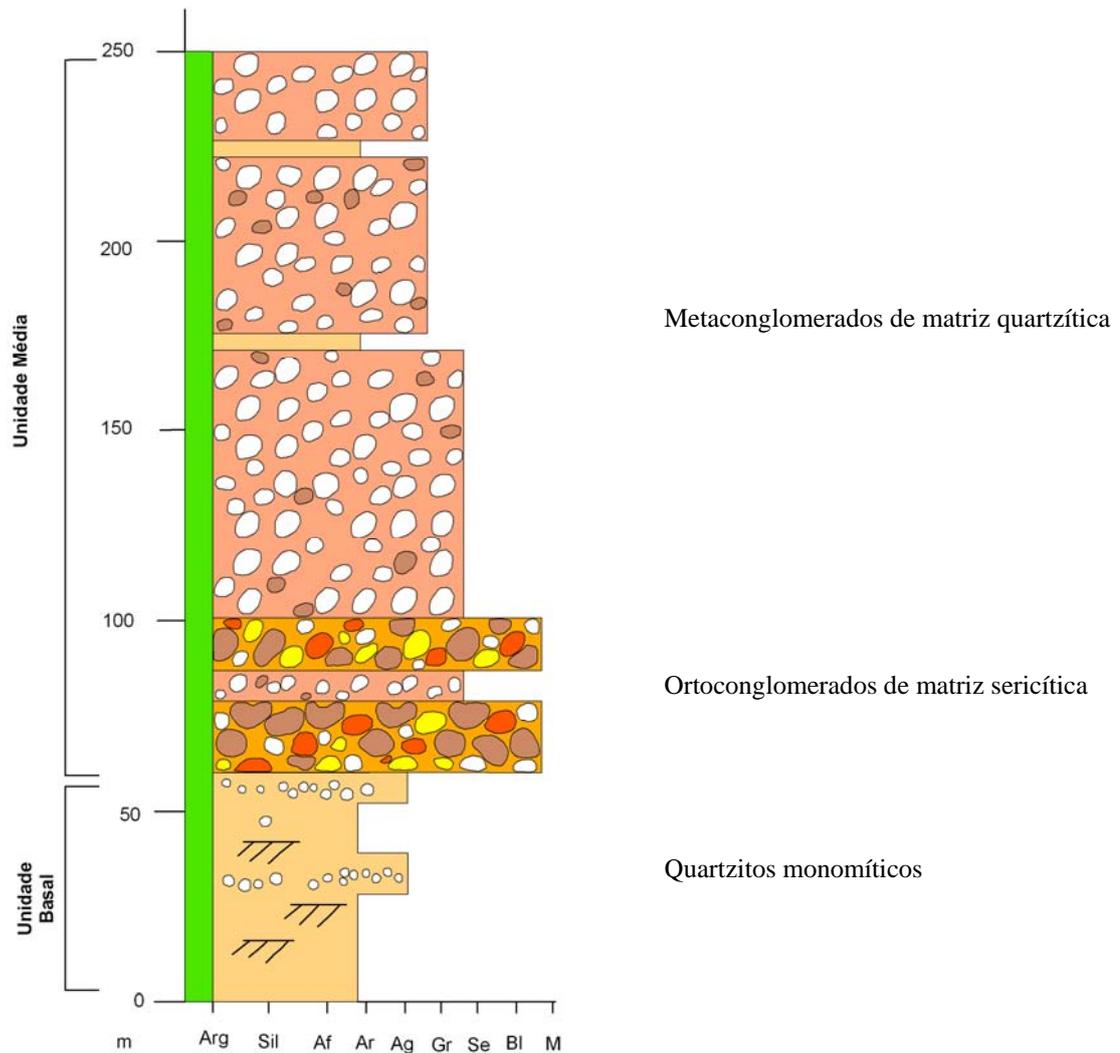


FIGURA 3.5 - Estratigrafia Geral da área de estudo Adaptado de Viegas (2010).

A Unidade Basal ou Inferior do Membro Caldeirões possui, em média, 150m de espessura e é composta por quartzito conglomerático monomítico branco, bege e rosado. A matriz é formada por quartzo com porções compostas por sericita e/ou feldspato. A unidade apresenta granulometria areia fina a média, os grãos são subarredondados a subangulosos, sendo mal selecionado. Além disso, possui clastos de tamanho granulo a seixo, tipologicamente de quartzo leitoso que podem estar distribuídos de maneira irregular ou intercalados formando horizontes centimétricos de seixos. Destaca-se a existência de

estratificações cruzadas tabulares centimétricas a métricas (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; VIEGAS, 2010; SILVA, 2010).

O quartzito da unidade basal apresenta laminações de coloração acinzentada, concreções ferruginosas e cristalização de magnetita e hematita distribuídas irregularmente nos pacotes sedimentares (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; VIEGAS, 2010). O contato entre as Unidade Basal e Média é concordante e erosivo. A Unidade Média é composta por conglomerados polimíticos. Devido à composição mineralógica, a natureza, distribuição e presença de clastos da matriz, podem ser classificadas dois tipos de camadas: 1) ortoconglomerados de matriz sericítica; 2) paraconglomerados de matriz quartzítica (VIEGAS, 2010).

A camada de ortoconglomerados de matriz sericítica é composta por clastos com matriz esverdeada constituída por areia fina, sericita, clorita, feldspato e turmalina. Os clastos são angulosos a subarredondados; possuem tamanhos granulo a matacão originados de quartzo, quartzito, quartzito ferruginoso, itabirito e conglomerado (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; VIEGAS, 2010; SILVA, 2010). Essa camada estratigráfica possui 40m de espessura e apresenta contato gradacional, com a unidade sotoposta (VIEGAS, 2010).

A camada de paraconglomerados de matriz quartzítica possui espessura irregular e em alguns locais atinge 150m. A matriz dessa rocha é quartzosa e feldspática²³, de granulometria areia fina a média, localmente grossa. Os clastos são subarredondados a subangulosos, granulometria seixo a bloco, tipologicamente formada por quartzito, quartzo, quartzito ferruginoso e concreções ferruginosas. O quartzito aflora como lentes e camadas métricas a decamétricas, branco a rosa, granulometria areia média a grossa (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; VIEGAS, 2010; SILVA, 2010).

Em geral, ortoconglomerados polimíticos são os mais propícios à ocorrência de diamantes. Nesta área destaca-se a existência do maior número de lavras de extração diamantífera, entre elas a Lavra Serrinha (ALVARENGA, 1982; NOGUEIRA; FELINTO, 1982; SILVA, 2010).

Na área de pesquisa, as rochas intrusivas metabásicas (900 Ma) cortam as unidades da Formação Sopa-Brumadinho (FIG. 3.4) e são representadas por diques com direções preferenciais N-S, NW-SE, ESE-WNW, encaixadas em falhas ou fraturas (VIEGAS, 2010; NOGUEIRA; FELINTO, 1982). Conforme Fogaça (1997), os diques de rochas metabásicas

²³ Conforme Viegas (2010), em algumas porções a matriz apresenta composição micácea.

nem sempre são contínuos ao longo das falhas, às vezes bifurcam-se, desaparecem ou ficam espessados em locais de cruzamento de duas ou mais falhas.

Os afloramentos dessas rochas são raros na área de estudo, uma vez que foram alterados e são identificados, principalmente, pela presença de solos avermelhados (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; FOGAÇA, 1997). Os depósitos do Terciário/Quaternário são sedimentos aluvionares localizados principalmente próximo às drenagens existentes, porém são encontrados com maior expressividade ao longo do Ribeirão do Inferno (FIG. 3.4).

Conforme Nogueira e Felinto (1982), os depósitos coluvionares são geralmente compostos por material grosseiro, mal selecionado, constituído principalmente por areias avermelhadas e claras, com pequenos seixos de quartzo leitoso. Esses depósitos são resultantes da deposição de material transportado principalmente pelas águas pluviais em encostas de gradientes elevados.

3.2.2.1. Geologia Estrutural

O arranjo estrutural da área é composto por linhas com *trend* que corroboram com a direção das estruturas no Supergrupo Espinhaço (N-S), bem como outras linhas gerais com direção NE-SW, como dobras e lineamentos (FIG. 3.4). Nogueira e Felinto (1982) e Viegas (2010) defendem que essa área pode ser compartimentada em dois domínios estruturais: um próximo ao distrito de Extração, com direção NW-SE, e outro a norte, com direção NE-SW.

Silva (2010) assegura que a região de Extração permite concluir que a estruturação dos metassedimentos do Supergrupo Espinhaço representa o resultado de tectônica relativamente complexa, registrada pela intensa acomodação e deformação dos terrenos com resposta à tectônica de inversão da bacia. O autor ressalta que além das direções estruturais preferenciais apresentadas (N-S; NW-SE e NE-SW), há lineamentos com direção W-E, como pode ser verificado pelo padrão de encaixamento do Ribeirão do Inferno.

3.3. Clima

O clima na área de estudo é influenciado pelo fator orográfico e é classificado como Cwb (Mesotérmico), conforme a classificação de Köppen-Geiger (1948). O clima é caracterizado por apresentar duas estações bem definidas: chuvosa (novembro a janeiro) e seca (principalmente de junho a agosto). As temperaturas são amenas durante todo o ano, com média anual de 18°C a 19°C.

A umidade relativa máxima equivale a 89,7%, e a mínima corresponde a 72,3% em média. O índice pluviométrico anual médio é 1.404 mm (INMET, 2010). O GRAF. 3.1 demonstra os dados de precipitação total e temperatura no período de 2008 a julho de 2012.

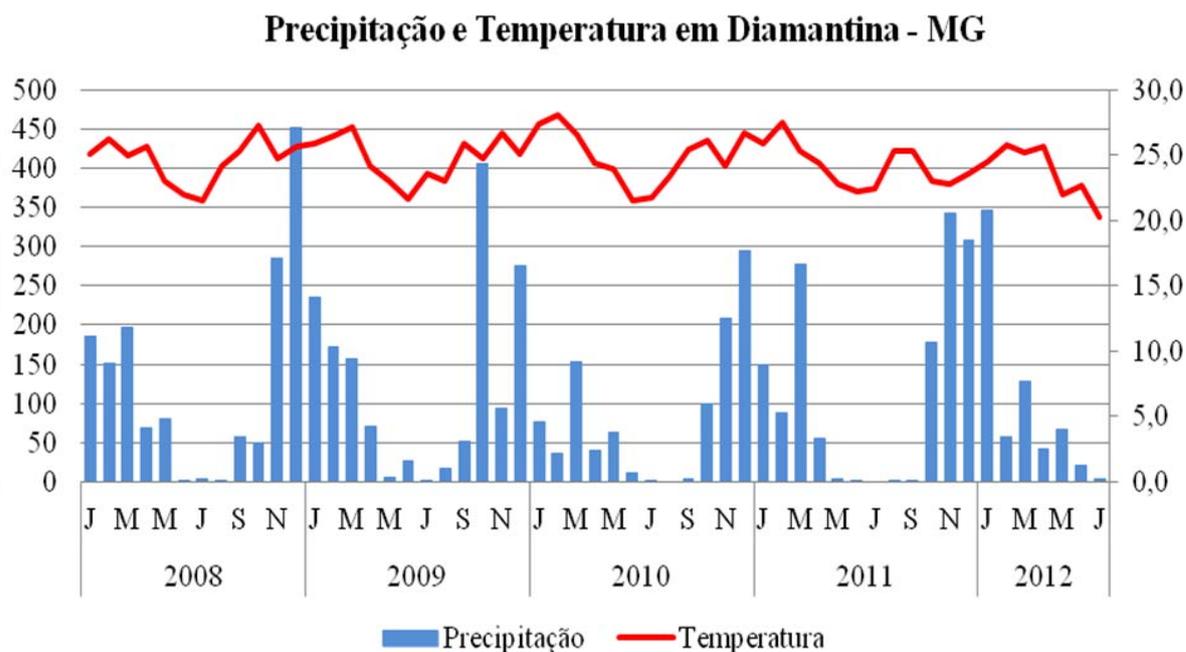


GRÁFICO 3.1 – Precipitação e temperatura em Diamantina/MG no período de jul/2008 a jul/2012

Fonte: INMET (2012). Organizado Souza, F. C. R. (2012)

3.4. Geomorfologia

3.4.1. Geomorfologia Regional

A área de estudo está inserida na Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) limita o sudeste do Cráton São Francisco e amalgama-se, para nordeste, com a Faixa Araçuaí (ALMEIDA ABREU, 1995). A Serra do Espinhaço constitui no conjunto de terras altas, de direção geral norte-sul (N-S) e convexidade orientada para oeste. Essa unidade geomorfológica, que pode ser definida pelo termo “planalto”, representa o divisor hidrográfico entre as bacias do centro leste brasileiro e a do Rio São Francisco (SAADI, 1995).

Na Serra do Espinhaço, em Minas Gerais, o alinhamento geral N-S é constituído por linhas de cristas descontínuas, composto pelo cruzamento das direções próximas de NE-SW e NW-SE. O aspecto topográfico desta unidade geomorfológica na região de Diamantina é representado por planalto de aspecto maciço (SAADI, 1995). Por isso, Saadi (1995) subdivide

geomorfologicamente a Serra do Espinhaço em dois compartimentos de planaltos, separados pela zona deprimida que passa por Couto de Magalhães. Esses compartimentos são: Planalto Meridional e Planalto Setentrional.

A área de estudo está inserida no Planalto Meridional, que se estende da Serra do Cipó, próximo de Belo Horizonte, até a zona deprimida de Couto de Magalhães e, portanto, corresponde aos limites geográficos da SdEM. O Planalto Meridional corresponde a uma área plana, ligeiramente convexa na borda oeste (SAADI, 1995). Na porção central do Planalto Meridional localiza-se o Planalto Diamantina.

As formas de relevo resultantes da dissecação da superfície composta predominantemente por quartzitos, densamente fraturada e cisalhada, são representadas, principalmente, por cristas, escarpas e vales profundos. Essas feições geomorfológicas estão adaptadas às direções tectônicas e estruturais. Há um conjunto de zonas deprimidas entre Gouveia e Conceição do Mato Dentro, que apresentam morfologias colinares policonvexas mais ou menos suavizadas. A morfologia nessas depressões está relacionada ao substrato composto por rochas granitóides, metassedimentares e metavulcânicas (SAADI, 1995).

As bordas deste compartimento, ambas nitidamente escarpadas, apresentam diferenças morfológicas relacionadas com as respectivas posições no contexto geotectônico global (SAADI, 1995). Pflug (1965) afirma que o caráter das rochas da região e o estilo estrutural a que estão condicionadas favorece a evolução e desenvolvimento de diferentes tipos de relevo.

Freyberg (1932) citado por Pflug (1965) definiu cinco paisagens geomorfológicas principais: Escarpas Escalonadas (a oeste da Serra do Espinhaço); as Chapadas (a nordeste); “hogbacks” (na margem leste e ao sul); os Planaltos (caracterizam o relevo predominante da região) e formas de Meia-laranja (localizadas em zonas de decomposição intensa de rochas). A FIG. 3.6 registra a declividade da SdEM e da área de estudo.

Salgado e Valadão (2005) constataram que a litoestrutura é o principal condicionante que controla as taxas de denudação geoquímica da SdEM na região do Planalto Diamantina. Leão *et al.* (2012) reforçam esta afirmação, reiteram que sobretudo a litologia influencia diretamente na determinação das taxas de erosão e denudação, e sua interferência é maior que todos os outros fatores ambientais (clima, vegetação e morfologia) juntos. Como o substrato da SdEM é composto predominantemente por quartzito, as taxas de erosão e denudação são baixas, o que contribui para a manutenção do conjunto morfológico em altitudes elevadas. Porém, a ocorrência de rochas frágeis ao intemperismo, como calcário, xisto e filito, na vertente oeste possibilita maiores taxas de denudação geoquímica nesta porção, mesmo que as áreas de ocorrência sejam restritas (LEÃO *et al.*, 2012).

Declividade da SdEM

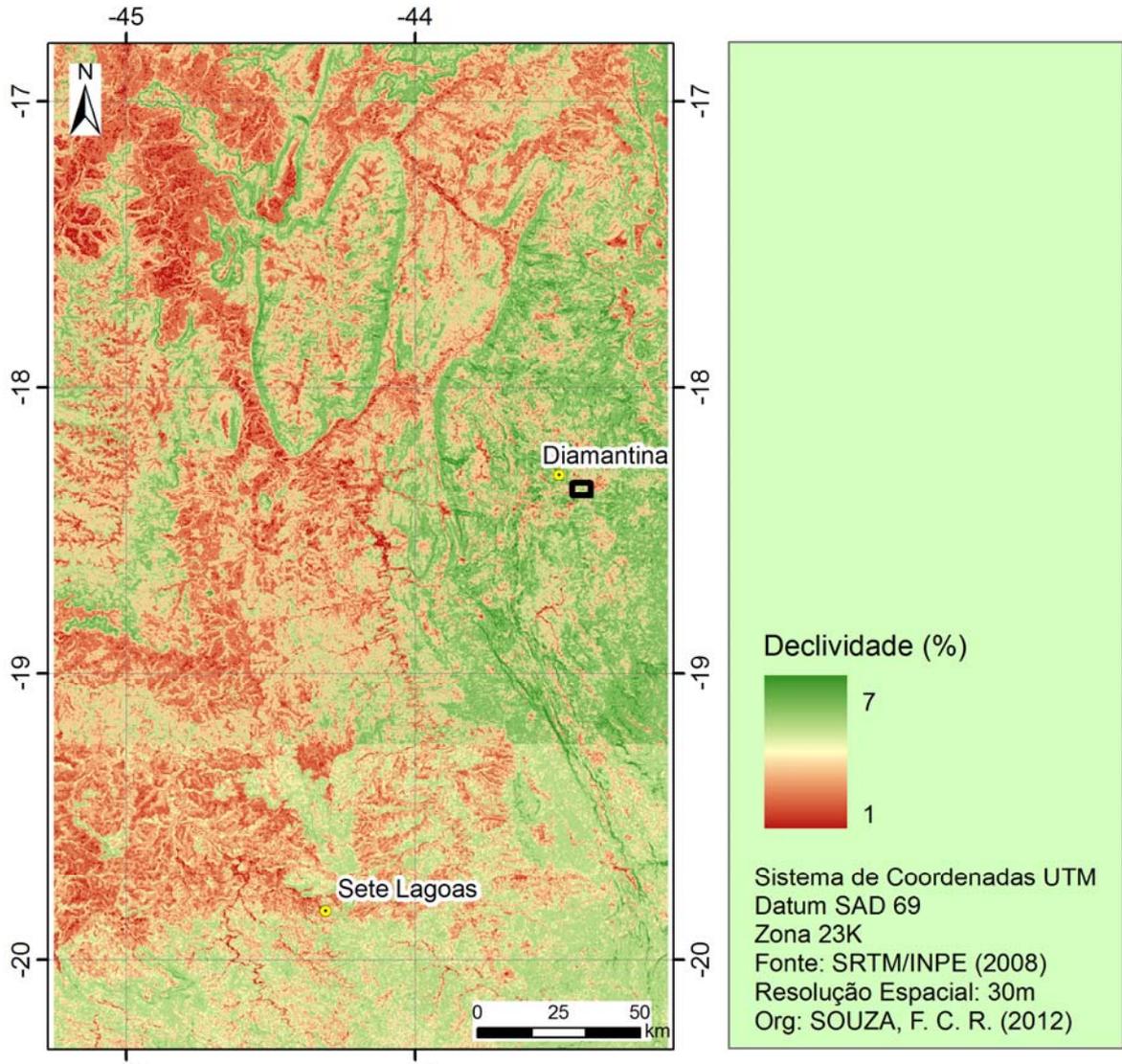


FIGURA 3.6 - Declividade da SdEM e da área de estudo

Salgado e Valadão (2005) definem que na Depressão de Gouveia e entorno, as taxas de denudação geoquímica são baixas nas áreas de litologia quartzítica e elevada nas unidades recobertas por granito e gnaisse. Leão *et al.* (2012) apresentam comportamentos morfológicos e denudacionais diferentes nas vertentes leste e oeste da SdEM. Morfológicamente a vertente leste da média SdEM apresenta maior declividade e, teoricamente, cursos fluviais mais agressivos que a vertente oeste. Entretanto, devido aos fatores litológicos, a vertente oeste apresenta ocorrência e intensidade de geformas erosivas e os dados de denudação geoquímica registram que atualmente as taxas de perdas geoquímicas são maiores na vertente oeste. Desta forma, os autores constataam que os processos denudacionais tiveram dois

momentos diferenciados, que são demarcados pela exumação de granito, gnaisses e rochas carbonáticas na vertente oeste.

Antes desta exumação, as taxas denudacionais ocorriam em ambas as vertentes e eram mais pronunciadas na vertente leste. Entretanto, a erosão removeu os quartzitos, provocando a exumação de granitos, gnaisses e rochas carbonáticas e, conseqüentemente, o alargamento dos vales e a formação de janelas estruturais, como a Depressão de Gouveia (AUGUSTIN; ARANHA, 2006). Com a exumação, as taxas denudacionais tornam-se maiores na vertente oeste (LEÃO *et al.*, 2012).

Leão *et al.* (2012) apontam que as rochas exumadas são parcialmente protegidas por cinturões de quartzitos que sustentam essas litologias em patamares elevados. No entanto, com taxas elevadas de denudação das litologias menos resistentes, os quartzitos sotopostos a elas perdem sustentação e colapsam. Ou seja, destaca-se a ocorrência dos processos de retração lateral das escarpas na porção média da SdEM. E esse processo é semelhante ao verificado por Salgado *et al.* (2007) nas terras altas do Quadrilátero Ferrífero.

Barreto (2012) demonstra que a atividade de mineração interfere nas taxas de erosão e denudação no Planalto Diamantina. Nesta área, as taxas denudacionais são maiores nas áreas onde a exploração de diamantes ocorre através da remoção do saprolito, e são menores nas bacias onde os sedimentos aluviais foram retrabalhados pelo garimpo deste minério.

3.5. Hidrografia

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, especificamente na unidade de planejamento da Bacia do Alto Jequitinhonha. Os principais cursos hídricos que drenam a área pesquisada são o Ribeirão do Inferno e os Córregos: Curralinho, Mulatinho, da Palha, da Prata, Ponte Queimada, Junta-Junta e Jacá. A FIG. 3.7 mostra localização da área de estudo nas bacias hidrográficas do Rio Jequitinhonha, do Alto Jequitinhonha e registra a hidrografia da área pesquisada associada os principais lineamentos estruturais.

Localmente o Ribeirão do Inferno é a drenagem mais representativa, ocorre preferencialmente no sentido W-E e desagua na margem esquerda do Rio Jequitinhonha. Destaca-se, também, a existência de drenagens intermitentes.

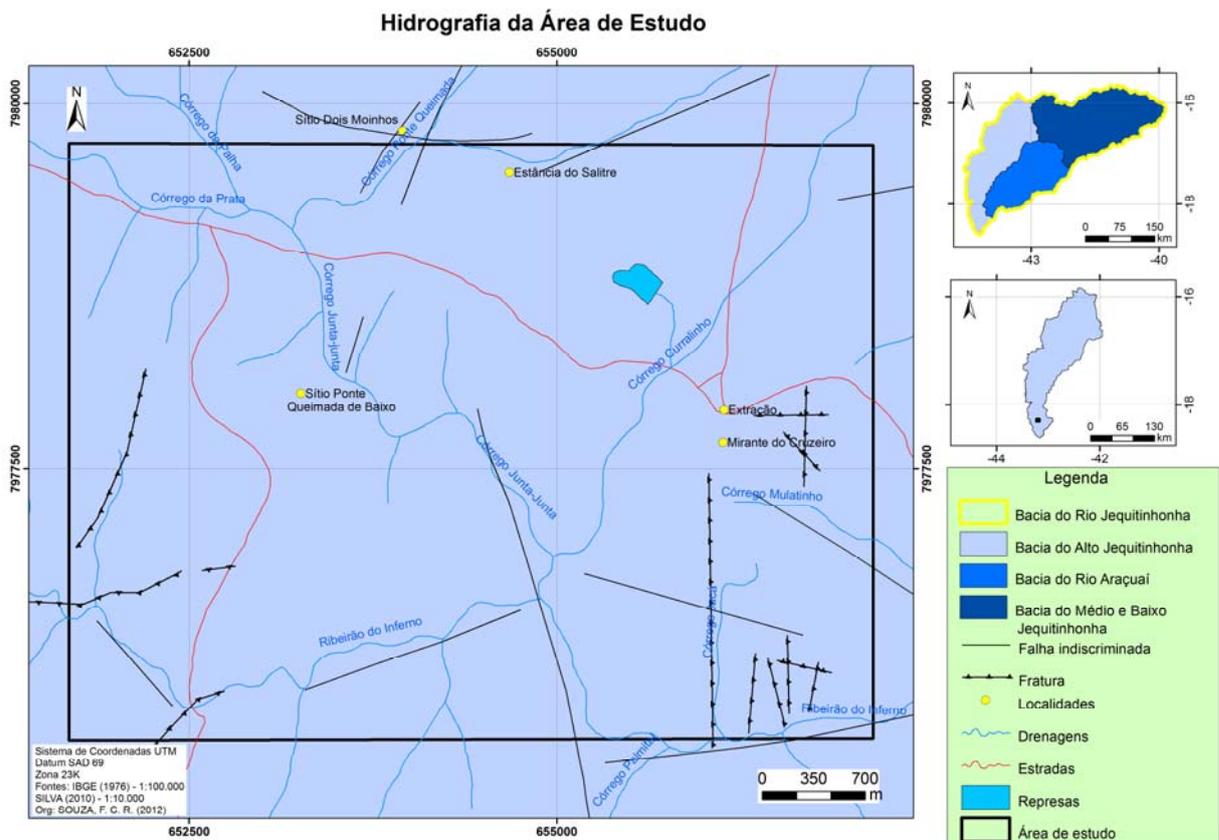


FIGURA 3.7 - Hidrografia da área de estudo associada aos lineamentos estruturais

A correlação entre os principais lineamentos estruturais e o padrão de drenagem demonstra que a maioria das drenagens é controlada estruturalmente pelas falhas e fraturas (FIG. 3.7). Destaca-se a presença predominante de vales encaixados, que estão associados ao controle estrutural na área. Alvarenga (1982), Nogueira e Felinto (1982), Knauer (1984), Viegas (2010) e Silva (2010) destacam que lineamentos estruturais, fraturas, clivagem e acamamento dos quartzitos são fatores que controlam as drenagens na região pesquisada, influenciando, principalmente, o Ribeirão do Inferno.

3.6. Solos e Vegetação

A formação dos solos está associada ao tipo de rocha existente e aos demais fatores como relevo, clima e organismos vivos, ao longo do tempo. Conforme Diniz *et al.* (2005) os solos na SdEM estão associados ao relevo e à litologia. Desta forma, os LATOSSOLOS Vermelhos se desenvolvem nas áreas de rochas metabásicas e de relevo suave ondulado e ondulado com vertentes convexas retilíneas e convexas. Os LATOSSOLOS Vermelhos Amarelos situam-se em áreas de granito, em relevo suave ondulado e ondulado com vertentes

convexas retilíneas. Localidades com litologias de granitos e xistos e relevo ondulado e forte ondulado favorecem o desenvolvimento de CAMBISSOLOS na SdEM. Já as áreas com ocorrências de quartzitos, altas declividades e clima ameno favorecem o desenvolvimento de NEOSSOLOS (DINIZ *et al.*, 2005).

Segundo o mapeamento pedológico da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1980), os solos da área de estudo correspondem a CAMBISSOLOS Háplicos argila de atividade baixa distróficos (CXbd) e NEOSSOLOS Litólicos distróficos (RLd), mas devido à escala do mapeamento²⁴, podem-se encontrar outras classes de solo. Destaca-se que os solos da área pesquisada originaram-se, predominantemente, de rochas quartzíticas e metabásicas. Os solos derivados de quartzitos são, em geral, Neossolos, caracterizados por serem arenosos, rasos, muito permeáveis, com coloração esbranquiçada e granulometria fina. Os solos provenientes da alteração de rochas metabásicas, por sua vez, são argilosos e apresentam coloração avermelhada (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; VIEGAS, 2010).

A cobertura vegetal está associada ao tipo de solo e ao clima predominante na região. Por isso, predomina a ocorrência de campos rupestres e campos de altitude nas áreas mais elevadas, com presença de rochas ou NEOSSOLOS. Já no fundo dos vales e com predominância de solos avermelhados desenvolve-se vegetação de Cerrado Típico.

²⁴ Escala 1:500.000

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos incluem etapas que subsidiam o desenvolvimento de todo o trabalho realizado, e etapas voltadas diretamente para: a) prospecção das geoformas cársticas; b) investigação das feições exocársticas e hidrológicas; c) caracterização geostatística de *kamenitzas*; d) caracterização das cavidades no seu contexto geográfico de inserção; e) caracterização morfológica das cavidades; f) caracterização macroscópica dos depósitos clásticos estratificados; g) análise química e caracterização microscópica de depósitos químicos; h) caracterização do contexto litoestrutural e geomorfológico de inserção das cavidades; i) interpretação do contexto geográfico local, sua relação com o desenvolvimento das feições cársticas e correlação com os dados obtidos.

4.1. Revisão Bibliográfica e Levantamento Cartográfico

Realizou-se a revisão bibliográfica com a finalidade de subsidiar o desenvolvimento do trabalho. Essa etapa foi composta por levantamento de trabalhos nacionais e internacionais sobre feições cársticas em rochas siliciclásticas e sobre o contexto fisiográfico regional e local, incluindo os dados de geologia, geomorfologia, clima, vegetação e solo. O levantamento bibliográfico envolveu, também, os trabalhos sobre espeleologia na área de estudo.

O levantamento de bases cartográficas visa a análise da área investigada, tendo como foco as principais características geológicas e geomorfológicas que podem interferir no desenvolvimento de feições cársticas. Para isso, utilizou-se a carta topográfica de Diamantina SE.23.Z.A.III, escala 1:100.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1979), o mapa geológico de Diamantina SE.23.Z.A.III, escala 1:100.000 do Projeto Espinhaço (FOGAÇA, 1997) e as bases cartográficas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM²⁵), escala 1:100.000. Os dados de estratigrafia e geologia estrutural foram obtidos junto aos mapeamentos geológicos de Nogueira e Felinto (1982), escala 1:25.000, Viegas (2010), escala 1:10.000 e Silva (2010), escala 1:10.000. Para o estudo da geomorfologia regional realizou-se o tratamento dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

²⁵ Base de dados disponível no Geobank da CPRM, cujo acesso encontra-se em <http://www.cprm.gov.br>. Acesso em: 20/05/2012

Foram efetuadas consultas à base de dados do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), que possibilitou o levantamento da distribuição espacial das cavidades já identificadas. A partir da compilação deste conjunto de dados foram gerados os mapas temáticos com características fisiográficas, que foram processados no software ArcGis 9.3. A análise dessas bases cartográficas subsidiou os trabalhos de campo, a delimitação da área de estudo e as demais etapas executivas deste trabalho.

4.2. Caracterização Geral das Feições Hidrológicas e Exocársticas

Após a delimitação da área de estudo, foram realizadas interpretações de fotografias aéreas e imagens de satélites com a finalidade de auxiliar as atividades de campo e permitir a identificação de feições exocársticas, que foram averiguadas em campo. Para isso realizou-se a fotointerpretação de fotografias aéreas do Projeto Serra do Espinhaço, Obra 12 do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Folha 2423, Faixa 8, Escala 1:25.000, distância focal 151,44mm, altura do vôo 3790m, executado pela Empresa Brasileira de Fotografias Aéreas S/C Ltda (Embrafoto) no período de 12/07 a 27/10/ 1979. Foram selecionadas as fotografias aéreas nº 382, 383, 384 e 385 do Projeto Serra do Espinhaço, bem como as fotografias aéreas efetuadas pela *United States Air Force* (USAF) da Obra 12 (DNPM/CPRM, 1979) na escala 1:60.000 da região de Extração. Essas fotografias foram interpretadas com estereoscópio para identificação de feições exocársticas. As imagens de satélites LANDSAT 7 TM Banda 3, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE²⁶), também foram utilizadas no processo de levantamento das feições exocársticas. Todas as fotografias aéreas utilizadas neste estudo foram obtidas na Biblioteca Professor Reinhard Pflug do Centro de Geologia Eschwege (CGE/ IGC/ UFMG).

Posteriormente executou-se a prospecção que incluiu 21 dias de trabalho de campo e permitiu identificar as principais feições cársticas existentes na área investigada. Esta etapa envolveu caminhamentos que buscou contemplar a maior parte da área de estudo. Foram identificadas feições exocársticas, cujos pontos foram marcados com o GPS Garmim Etrex, configurado para o Datum SAD 69, a fim de compor os mapas de espacialização dessas geoformas.

²⁶ Disponíveis no Catálogo de Imagens na página <http://www.inpe.br> Acesso em 10/08/2012.

4.2.1. Caracterização Geoestatística das Kamenitzas

Devido à recorrência de kamenitzas na área pesquisada optou-se por realizar o estudo estatístico descritivo destas feições. Considerando-se que as kamenitzas possuem distribuição espacial em toda a área investigada, a localização dos pontos selecionados visou envolver as unidades desta área. Com isso, foi executada a correlação das kamenitzas com as cotas altimétricas em que estão inseridas a fim de verificar a existência de relação deste indicador com os parâmetros morfométricos. Por isso, foram selecionados 12 pontos de amostragem e em cada ponto foram realizadas análises morfométricas de dez kamenitzas que estavam localizadas a um raio máximo de 5m daquele ponto. Portanto, foram investigadas 120 kamenitzas por considerá-las como o número representativo para interpretação. Em termos estatísticos este número amostral representa a análise de 5,28 kamenitzas por km². Os parâmetros utilizados na análise morfométrica foram extensão do eixo maior e menor de desenvolvimento das kamenitzas e profundidade média central de cada feição.

Posteriormente os dados morfométricos obtidos foram processados estatisticamente e foram calculados a média aritmética, a mediana, os quartis e o desvio padrão das 120 feições, com a finalidade de obter a caracterização geral das kamenitzas. Foram gerados gráficos através do software Excel 2007 e os intervalos utilizados para a elaboração dos gráficos e interpretação dos resultados foram organizados estatisticamente em cinco classes: i) de zero ao primeiro quartil, ii) do primeiro quartil à média, iii) da média ao segundo quartil, iv) do segundo quartil ao terceiro quartil e v) do terceiro quartil ao valor máximo. Os dados morfométricos coletados também foram processados no *software Statistica 7* que gerou o histograma de frequência tipo regular normal que registra a quantidade, extensão e profundidade das feições amostradas.

Os resultados de média aritmética de cada ponto foram tabulados e processados através do *software ArcGis 9.3*, através do qual foram gerados os mapas de dispersão de média aritmética da profundidade média central e da extensão do eixo maior e menor das feições interpretadas. Esses parâmetros foram agrupados em cinco classes, cujos intervalos utilizados para elaboração dos mapas foram os indicados pelo *software*. Este procedimento possibilita a caracterização morfométrica das kamenitzas no contexto espacial. O estudo geoestatístico não foi realizado com as demais feições exocársticas, principalmente porque o número amostral identificado até o momento é restrito e, conseqüentemente, a distribuição espacial, em alguns casos é pontual. Desta forma, apenas a caracterização individual das feições é considerada suficiente para caracterizá-las.

Por fim, foram apresentados os dados de densidade²⁷ das principais feições hidrológicas e exocársticas. A interpretação destas feições em termos morfométricos permite compará-las com outras áreas que apresentam as referidas geoformas em quartzitos. Para isso foi utilizado dados dos estudos em quartzitos no vale do rio Paraíba do Sul/MG executado por Uagoda *et al.*²⁸ (2011). A seleção desta área justifica-se porque está inserida em domínios de clima tropical úmido, litologia em quartzito e corresponde a um dos poucos estudos que apresentam dados quantitativos sobre as feições investigadas. Essa correlação foi passível de ser executada apenas para dolinas de dissolução, sumidouros e ressurgências porque são as feições mencionadas no trabalho de Uagoda *et al.* (2011). Entretanto, as discussões envolvem também a correlação entre a densidade de dolinas de dissolução observadas em áreas de quartzito e calcário. Por isso, realizou-se a correlação da densidade destas feições presentes na área de estudo, no vale do rio Paraíba do Sul (UAGODA *et al.*, 2011) e na região de Lagoa Santa/ MG (PILÓ, 1998).

4.3. Caracterização das Cavidades e seu Contexto Geográfico de Inserção

A identificação de cavidades e abrigos foi realizada, principalmente, durante as atividades de prospecção cárstica. As informações sobre a localização das cavidades foram obtidas junto às bases do CECAV, diálogo informal junto à população local e, especialmente, adensamento de caminhamentos que buscou contemplar as feições geomorfológicas associadas às cavidades. As cavidades identificadas foram georreferenciadas com o GPS Garmim Etrex, configurado para o Datum SAD 69, a fim de compor os mapas de espacialização dessas geoformas. O mapa foi processado no *software* ArcGis 9.3. Entre as principais cavidades identificadas, sete foram selecionadas para serem analisadas e topografadas. Os critérios de seleção foram os aspectos conceituais e morfométricos²⁹, presença de processos hidrológicos e de depósitos químicos em todas as cavidades.

Após a seleção das cavidades foram estruturadas fichas de caracterização geral dessas feições. Esta ficha visa o levantamento de informações gerais das cavidades, assim como a orientação e padronização das principais observações realizadas. Essas fichas foram tabuladas

²⁷ O cálculo da densidade (f) de ocorrência das feições corresponde a divisão da quantidade encontrada (n) pela área em km² (a) do local estudado, ou seja, $f=n/a$ ou $f=n/\text{km}^2$.

²⁸ Considerando-se que o autor apresenta dados de feições cársticas desenvolvidas em gnaiss, quartzito puro e quartzito impuro, para a correlação neste trabalho foram utilizados apenas os dados das feições em quartzitos (puros e impuros).

²⁹ Para este estudo foram consideradas as definições estabelecidas na Constituição Federal Brasileira de 1988 e no Decreto nº6640/2008, e os limites morfométricos mínimos definidos em Termo de Referência do CECAV.

e, com isso, geraram-se os gráficos com o *software* Excel 2007, referente aos seguintes atributos associados às cavidades:

- Feições estruturais
- Altitude topográfica
- Tipo de relevo e índice de declividade
- Inserção na vertente
- Processos hidrológicos
- Projeção horizontal³⁰
- Quantidade de entradas
- Presença de depósitos clásticos e químicos

4.3.1. Caracterização Morfológica das Cavidades

A caracterização morfológica das cavidades envolve a observação de: a) macro e microformas; b) o padrão planimétrico, conforme a classificação de Palmer (2007); c) a morfologia dos condutos, teto e piso; d) os processos hidrológicos; e e) os principais aspectos dos depósitos químicos, clásticos e orgânicos. Para isso, foram realizados no total 23 dias de trabalhos de campo que envolveu as topografias³¹ das cavidades, realizadas com grau de precisão 4, classe C, conforme definição da *British Cave Research Association (BRCA)*³². Foram utilizados para o levantamento topográfico os seguintes instrumentos: clinômetro e bússola *Sunnto Tandem 360PC* calibrado para a zona 3, trena a laser Bosch DLE 150, transferidor e escalímetro. As informações topográficas foram tabuladas no software *OnStation 3.0*, onde foram ajustados os dados obtidos e, posteriormente, exportados no formato .dxf para ser importado no software *Corel Draw X3*, onde foram retificados. A partir destes procedimentos foram gerados as plantas baixas e os cortes transversais das cavidades pesquisadas. Após o processamento dos dados topográficos foram obtidas as informações sobre projeção horizontal, desnível, área e volume das cavidades.

³⁰ Para o cálculo de projeção horizontal foi considerado apenas o plano horizontal e utilizou-se o princípio da descontinuidade, segundo orientação de Rubioli e Moura (2005)

³¹ Destaca-se que apenas uma cavidade deste estudo (a Gruta do Salitre) já havia sido topografada. Entretanto o grau de precisão do mapeamento não era suficiente para o desenvolvimento deste trabalho, por isso optou-se por retopografá-la.

³² Segundo definição da BRCA, o grau de precisão 4 equivale ao levantamento em que os ângulos horizontal e vertical são medidos com precisão entre 2,5 e 1°, as distâncias são medidas com precisão entre 50 e 10cm e o erro de posição da base oscile entre 50 e 10cm. A classe C corresponde ao levantamento em que as medidas de detalhe são realizadas apenas nas bases topográficas.

Foram correlacionados os dados de projeção horizontal das cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas da área de estudo e do Brasil. Esse procedimento permite compreender as características das cavidades da área de estudo em relação às identificadas e topografadas no território nacional. Para isso, realizou-se o levantamento dos dados de projeção horizontal das cavidades no Brasil e calculado o percentual de cavidades conforme as classes morfométricas. O levantamento envolveu a catalogação efetuada por Silva (2004), o trabalho de Fabri (2011), os dados deste estudo e trabalhos científicos sobre o assunto. Este procedimento resultou no registro de 100 cavidades no Brasil, o que representa aproximadamente 2,5% do total de cavidades em rochas siliciclásticas identificadas no país. O cálculo percentual das cavidades conforme as classes morfométricas e a elaboração do gráfico foram realizadas no software Excel.

4.4. Caracterização de depósitos químicos e depósitos clásticos estratificados

Os depósitos clásticos estratificados foram caracterizados em ficha previamente definida e elaborado o perfil de sedimentação dos mesmos. Após este procedimento foram coletadas amostras de, em média, 100g de cada estrato ou camada sedimentar para a análise de textura³³ e cor. A classificação de textura foi realizada conforme definições técnicas de Santos *et al.* (2005) e a classificação de cores foi executada em área superficial conforme Münsell (2000). Esta etapa visa apenas a caracterização geral e representativa dos depósitos estratificados das cavidades e, para isso, interpretou-se também a altura, extensão e organização estratigráfica nas cavidades.

Os depósitos químicos, por sua vez, também foram caracterizados e dez amostras foram coletadas para interpretação macroscópica e microscópica. Dentre essas dez amostras, seis foram selecionadas para a análise química, sendo uma amostra na Gruta das Sempre Vivas, quatro na Gruta Extração e uma na Gruta do Salitre, as quais incluem escorrimentos e estalagmites. Todas as coletas realizadas neste trabalho foram autorizadas (nº 36472-1) pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade do Ministério do Meio Ambiente (Sisbio/ ICMBio/ MMA), conforme previsto na Instrução Normativa IBAMA nº154, de 1º de Março de 2007. As informações sobre o tipo de deposição química, a quantidade e a cavidade onde se localizam estão especificadas na TABELA 4.4.1.

³³ A definição da textura foi realizada apenas em campo, pois objetiva somente a caracterização geral dos perfis.

TABELA 4.4.1

Identificação dos tipos de amostras selecionadas para análise química

Quantidade	Tipo de amostra	Cavidade	Nº das amostras
01	Escorrimento	Gruta das Sempre Vivas	GSV01
03	Estalagmites	Gruta Extração	GE02, GE03 e GE04
01	Escorrimento	Gruta Extração	GE05
01	Escorrimento	Gruta do Salitre	GS06

As amostras foram coletadas apenas nestas cavidades porque as demais (Gruta Curralinho, Lapa Ribeirão do Inferno e Gruta Monte Cristo) apresentavam apenas coralóides do tipo *cave popcorn*. Assim, apesar dessas feições serem deposições químicas importantes na interpretação espeleológica são difíceis de coletar sem fragmentá-las. Além disso, a maioria dos coralóides possui características morfométricas que dificultam e oneram a elaboração de lâminas delgadas polidas e também limitam a interpretação das camadas de deposição. Foram coletados apenas escorrimentos e estalagmites, pois:

- a) segundo o levantamento realizado em campo, esses são os tipos de espeleotemas mais comuns e recorrentes nas cavidades da área de estudo;
- b) procurou-se interpretar as deposições químicas mais recorrentes por considerá-las representativas para análise geral da área;
- c) são feições passíveis de coleta, transporte e laminação;
- d) buscou-se preservar espeleotemas poucos comuns regionalmente, que podem indicar a relevância da cavidade. Afinal, represas de sílica, também confundidos com travestinos, por exemplo, apesar de ser comum em cavidades em rochas carbonáticas, foi verificado apenas em uma cavidade (Gruta do Salitre) da área estudada e localizava-se de forma pontual nesta cavidade.

O número amostral selecionado para análise química justifica-se por considerá-lo a quantidade representativa para a interpretação em relação à área estudada e ao número de cavidades caracterizadas, levando em consideração também os limites operacionais. A Gruta Extração concentra o maior número de amostras interpretadas, pois esta cavidade possui a maior variedade de espeleotemas e os depósitos químicos com as maiores extensões entre as cavidades em quartzitos já identificadas localmente.

As amostras foram submetidas ao serviço de laminação no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (Degeo/UFOP), onde foram confeccionadas lâminas polidas delgadas. Em seguida, as lâminas foram descritas no microscópio óptico no Centro de Pesquisa Manuel Teixeira Costa (CPMTC/IGC/UFMG), onde foram verificadas diferenças na

quantidade e distribuição da deposição química e selecionadas zonas para aprofundamento da análise microscópica no *Scanning Electron Microscopy* ou Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM ou MEV).

As lâminas foram preparadas para análise no MEV e esta etapa envolveu a metalização e evaporação de carbono, que consiste na combustão de fita de carbono e cobertura ultrafina da lâmina por este material. Este procedimento é realizado para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos na amostra devido à irradiação elétrica que ocorre durante a produção da imagem microscópica. Além disso, a metalização é importante porque mesmo quando há condução elétrica acima do suficiente, melhora o contraste, resolução e qualidade da imagem. Este procedimento foi realizado no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (CM/ UFMG).

A análise microscópica e química foi desenvolvida no CM/UFMG com a utilização do MEV *Field Emission Gun* ou Canhão por Efeito de Campo (FEG) Quanta 200 com *Energy Dispersive X-Ray Detector* ou Espectrometria de Energia Dispersiva (EDX ou EDS). Assim, o MEV FEG Quanta 200 possui resolução máxima de 1,6nm em alto vácuo e detectores capazes de captar diversos sinais de elétrons. Esse equipamento detecta sinais de: a) elétrons secundários em vácuo ambiental, alto e baixo vácuo; b) elétrons retroespalhados em alto e baixo vácuo; c) elétrons transmitidos em alto vácuo. Além disso, foram detectados raios-X característicos através de EDS, o que possibilitou a análise da composição química de forma qualitativa. Dessa forma, com o MEV FEG Quanta 200 e EDS realizou-se: a) interpretação de imagens das camadas de deposição química, b) análise qualitativa da composição química geral das amostras em diferentes camadas de deposição, c) distribuição de cada elemento químico na projeção linear em diferentes camadas de formação dos espeleotemas.

As imagens foram geradas em diversas escalas, conforme as características particulares de cada amostra; e o aumento oscilou de 100x a 15000x, de acordo com o grau de detalhamento selecionado. As amostras foram submetidas à tensão elétrica (HV) de 15,0kV ou 30kV. Composição química qualitativa geral das amostras, por sua vez, envolveu especialmente a análise dos elementos maiores (Si, Al, Ca, Mg, K, F e O) e em alguns casos identificou-se outros elementos químicos que estavam presentes nas amostras. Todos os elementos foram identificados nas constantes de raios (Ka) alfa e (Kb) beta.

Os dados obtidos foram tabulados, estruturados e interpretados para apresentar as características das deposições químicas. Por fim, os resultados analisados foram discutidos com base em fundamentos teóricos sobre feições cársticas em rochas siliciclásticas e com

estudos microquímicos realizados em espeleotemas em quartzitos, como, por exemplo, o trabalho de Willems *et al.* (2002) e Willems (2006).

4.5. Caracterização dos Fatores Litoestruturais Associados ao Desenvolvimento das Cavidades

A partir do levantamento dos lineamentos estruturais, da base estratigráfica elaborada por Nogueira e Felinto (1982), escala 1:25.000 e do SRTM, resolução espacial 30m, elaborou-se perfis topográficos que registram o contexto litoestrutural e geomorfológico da área pesquisada. A elaboração dos perfis objetiva contextualizar as principais características fisiográficas da área onde as cavidades estão inseridas, bem como auxiliar na verificação de fatores geológicos, geomorfológicos e estruturais envolvidos no desenvolvimento das cavidades. Por isso, foram traçados três perfis segundo os *trends* ENE-WSW, N-S e WSW-E, que foram executados manualmente, conforme orientações técnicas do IBGE (1998) e processados no software *Corel Draw X3*. A definição do direcionamento dos perfis topográficos objetiva envolver a localização de todas as cavidades pesquisadas.

4.5.1. Contexto Litológico de Inserção das Cavidades

Para a caracterização litológica foi executado trabalho de campo com a finalidade de identificar as feições estruturais superficiais e selecionar locais para coleta de rochas. Esta etapa foi realizada durante os trabalhos de prospecção cárstica e também durante uma campanha de três dias, destinada exclusivamente para esta finalidade. Os pontos de coletas foram previamente definidos de forma que representassem as principais fácies do Membro Campo Sampaio, Formação Sopa-Brumadinho, priorizasse os maciços de inserção das cavidades e envolvesse pontos não contemplados em trabalhos de geologia desta área (NOGUEIRA; FELINTO, 1982; SILVA, 2010; VIEGAS, 2010). Foram selecionadas cinco amostras para elaboração de lâminas petrográficas delgadas. O serviço de laminação foi realizado no Laboratório de Petrografia do CPMTIC/IGC/UFMG. A análise macroscópica das rochas foi realizada com uso de lupa 10x de aumento.

As lâminas delgadas foram analisadas e descritas com a utilização de microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida no CPMTIC/IGC/UFMG. A análise petrográfica envolveu a descrição de informações como o tipo e percentual da composição mineralógica, presença de microestruturas internas e fotomicrografia das lâminas com nicóis cruzados,

aumento 2,5x. Esses dados foram correlacionados com o contexto geográfico da área e verificados as suas relações com o surgimento das cavidades investigadas.

Os dados litológicos foram analisados conforme a composição mineralógica, porosidade primária e granulometria. As discussões envolveram a correlação com estudos quantitativos da composição geoquímica de diferentes fácies da Formação Sopa Brumadinho na área de estudo, que foram demonstrados por outros autores: quartzitos (Rodet *et al.* 2009) e clastos ferruginosos dos ortoconglomerados (Silva, 2010). As informações obtidas neste estudo também foram discutidas com base nas prerrogativas de Ford e Williams (2007) quanto à influência da litologia no desenvolvimento de feições cársticas em rochas siliciclásticas. E, por fim, foram correlacionadas com estudos sobre cavidades em quartzito no Brasil, como os trabalhos de Corrêa Neto *et al.* (1993, 1997), Corrêa Neto (1997), Silva (2004) e Fabri (2011).

4.5.2. Contexto Estrutural de Inserção das Cavidades

A caracterização do contexto estrutural de inserção das cavidades investigadas foi realizada através de um conjunto de procedimentos que envolveram a análise de: a) direção dos lineamentos estruturais na área externa ou superficial; b) direção dos planos de fratura no interior das cavidades; c) direção e mergulho dos planos de acamamento na superfície e no interior de algumas cavidades; d) direção e mergulho da xistosidade; e) direção dos condutos das cavidades. Além disso, realizou-se a análise de curvas fluviais anômalas.

Para o levantamento da direção dos lineamentos estruturais na área externa ou superficial realizou-se a interpretação de fotografias aéreas do Projeto Serra do Espinhaço (DNPM/CPRM, 1979). As fotografias aéreas 384 e 385 deste projeto foram interpoladas, georreferenciadas no software ArcGis 9.3 e interpretadas nas bandas RGB 213 para identificação dos lineamentos estruturais. A identificação e vetorização dos lineamentos foram organizadas segundo o direcionamento estrutural e teve como base metodológica os procedimentos de fotogeologia indicados por Lopez Vergara (1978) e Andrades Filho e Fonseca (2009). As imagens do Google Earth da região também foram georreferenciadas no ArcGis 9.3 e interpretadas nas bandas RGB 213 para identificação dos lineamentos estruturais que não foram visualizados nas fotografias aéreas, devido, entre outros fatores, à presença de nuvens. Além disso, foram interpretados lineamentos estruturais em imagens de satélite RapidEye, obtidas em 2010, com resolução espacial de 5m, resolução radiométrica 12 bits, sensor multiespectral, comprimento de onda entre 440nm e 850nm, órbita 233, ponto 0621,

nível 3 e ortorretificadas. As imagens foram disponibilizadas pelo Núcleo de Geoprocessamento da Fundação Estadual do Meio Ambiente (NDG/ FEAM). Essas imagens foram processadas no software ArcGis 9.3 com a ferramenta *Hillshade*, orientadas segundo os azimutes de iluminação 45, 90, 180, 270 e 315, a altitude de todos os ângulos foi 45 graus e o fator Z equivaleu a 1m.

A partir dos dados estruturais interpretados e vetorizados, tabularam-se as direções dos lineamentos, elaborou-se o mapa de lineamentos estruturais e gerou-se o diagrama de rosetas para representar os padrões estruturais preferenciais na área de estudo. Este procedimento foi realizado no *software Stereo32* versão 1.0.3.

Para análise de curvas fluviais anômalas na área superficial, foram utilizadas imagens de satélite *RapidEye*, interpretadas nas bandas RGB 154 no software ArcGis 9.3. Essas imagens também foram processadas com a ferramenta *Hillshade* do *software* ArcGis 9.3 para análise do direcionamento dos segmentos fluviais superficiais. Esses direcionamentos foram agrupados segundo os *trends* SW, SE, NE, S e N e, para isso, os azimutes de iluminação *Hillshade* foram, respectivamente, 230, 120, 60, 180 e 0; a altitude para todos os ângulos foi 45 graus e o fator Z equivaleu a 1m. Após a interpretação da distribuição espacial do direcionamento dos segmentos fluviais superficiais, as informações obtidas foram processadas no *software Stereo32* versão 1.0.3, que gerou o diagrama de rosetas, e no *software Excel* 2007, que gerou o gráfico das informações levantadas. Os procedimentos utilizados para as análises hidrológicas visam identificar a relação entre as respostas dos comportamentos hidrológicos ao contexto litoestrutural e geomorfológico. Desta forma, os dados obtidos nesta etapa, associados às informações geológicas e geomorfológicas, podem indicar a relação desses indicadores com o desenvolvimento das feições cársticas na área pesquisada.

A aferição da direção e mergulho dos planos de acamamento e xistosidade foi realizada em campo durante a campanha de campo para caracterização litológica local. Para isso, utilizou-se a bússola Brunton e procurou-se envolver diferentes unidades geológicas da área pesquisada. Os resultados obtidos foram tabulados e processados no *software Stereo32* 1.0.3, organizados em classes de 10°.

A aferição da direção dos planos de fratura no interior das cavidades foi realizada durante trabalho de campo de cinco dias com esta finalidade. Para isso, utilizou-se a bússola Brunton devidamente calibrada para a região. Os resultados obtidos foram registrados em ficha elaborada para esta finalidade e a direção e a localização dessas estruturas geológicas foram mapeadas na planta baixa de topografia das cavidades. Os dados da análise estrutural foram processados no *software Stereo32* 1.0.3, que gerou o diagrama de rosetas e o mapa

topográfico da cavidade com a localização dos lineamentos estruturais foi processado no *software Corel Draw X3*.

A análise da direção dos condutos das cavidades foi realizada a partir da manipulação da planta baixa das cavidades. Este procedimento foi realizado manualmente com o uso de transferidor e registrado em planilha elaborada para esta finalidade. Os resultados obtidos foram processados no *software Stereo32 1.0.3* que fornece o diagrama de rosetas.

A partir dos dados obtidos foi realizada a correlação entre a direção dos condutos, direção dos planos de fratura no interior das cavidades para cada uma das cavidades especificamente. Estes dados foram correlacionados também com a morfologia dos condutos e padrão planimétrico das cavidades.

Posteriormente foi executada a correlação de dados de direção dos planos de acamamento presentes em todas as cavidades, com a direção dos condutos de todas as cavidades, a direção dos lineamentos estruturais superficiais, a direção e mergulho dos planos de acamamento e xistosidade. Este procedimento visa a interpretação geral de comportamento estrutural na área de estudo e a relação destes com as cavidades investigadas. Por fim, os dados estruturais foram: a) discutidos segundo as prerrogativas clássicas de Dreybrodt (1998), Ford e Williams (2007) e Palmer (2009); b) correlacionados com os dados estruturais para outras cavidades desenvolvidas em quartzito no Brasil, conforme Corrêa Neto *et al.* (1997), Corrêa Neto (1997), Silva (2004) e Fabri (2011).

4.5.3. Contexto Geomorfológico de Inserção das Cavidades

A análise do contexto geomorfológico de inserção das cavidades ocorreu a partir da elaboração de: a) modelo digital de elevação (MDE), b) mapa geomorfológico da área de estudo, c) perfis topográficos das vertentes onde se localizam as cavidades analisadas e d) cálculo do gradiente de relevo local e regional de inserção das cavidades.

O MDE foi gerado a partir de curvas de nível com equidistância 30m. O mapa geomorfológico da área de estudo foi elaborado a partir da interpolação de imagens SRTM resolução espacial de 30m, do MDE e com base em imagens de satélite RapidEye resolução espacial 5m. Os perfis topográficos das vertentes de inserção das cavidades foram elaborados a partir de curvas de nível com equidistância de 50m, executado conforme os procedimentos indicados pelo IBGE (1997) e processados no *software Corel Draw X3*. O gradiente de relevo local de inserção das cavidades foi calculado conforme procedimentos indicados pelo IBGE (1997), através da EQUAÇÃO 4.5.1:

$$[(A_{\max} - A_{\min})/D] \cdot 100$$

A_{max}: altitude máxima

A_{min}: altitude mínima

D: distância

EQUAÇÃO 4.5.1 - Cálculo de gradiente do relevo local

Os resultados obtidos a partir deste procedimento foram cruzados com os dados de projeção horizontal, desnível, a fim de verificar a relação entre estes indicadores. Por fim, realizaram-se discussões com outros trabalhos sobre esse tema.

4.5.4. Contexto Geográfico de Inserção das Feições Cársticas

A análise sintética do contexto geográfico da área de estudo foi realizada com base na interpretação de todos os resultados obtidos e sua associação com estudos sobre as taxas de lixiviação de sílica (SANTOS, 2012) e taxas de concentração química dissolvida e de denundação (BARRETO, 2012) nos limites da área de estudo. Com base nos processos envolvidos no desenvolvimento de feições cársticas em rochas siliciclásticas, conforme aponta Martini (1974, 1979) e Urbani (1984) e na interpretação geral da área estudada elaborou-se e discutiu-se uma hipótese de formação das feições cárstica na região SE de Diamantina. A hipótese construída foi representada através de bloco diagramas processados no *software Corel Draw X3*.

5. CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES EXOCÁRSTICAS

A área pesquisada é caracterizada pela presença de feições exocársticas como torres, verrugas, arcos, lapiás, maciços, paredões e depressões negativas. A FIG. 5.1 demonstra a localização espacial das principais feições exocársticas presentes na região SE de Diamantina. As torres (FIG. 5.2A e B) possuem em média quatro metros de altura e localizam-se geralmente em áreas de relevo ondulado. Essas feições residuais são recorrentes na área de estudo e geralmente possuem karren alveolares em suas paredes.

As verrugas, por sua vez, são feições residuais distribuídas ao longo de toda a área de estudo e ocorrem, geralmente, associadas a coberturas pedológicas, mesmo que seja NEOSSOLO Quartzarênico (FIG. 5.2C e D). Os arcos são feições residuais de ocorrência restrita, geralmente possuem fundo irregular e apresentam altura média entre um e três metros (FIG. 5.2E e F). Os arcos, devido ao seu tamanho, não foram visualizados em fotos aéreas e imagens de satélites e foram identificadas apenas em campo. Por isso, acredita-se na existência de mais feições na área pesquisada além das mapeadas, embora as características morfológicas sejam semelhantes, dadas as condições de relativa homogeneidade estratigráfica local.

Os karren e alvéolos (*wall pockets*) (Fig. 5.3A, E e F) ocorrem associados a maciços, paredões e afloramentos que existem na área pesquisada. A escala de representação espacial não permite o mapeamento dessas feições, embora sua ocorrência seja comum e a identificação destas geoformas ocorreu exclusivamente em campo.

As kamenitzas (FIG. 5.3B) são feições recorrentes e estão distribuídas espacialmente em toda a área, relacionadas, principalmente, à presença de afloramentos. Essas feições foram identificadas apenas em campo e devido à escala de representação não foram espacializadas no mapa de feições exocársticas.

Os maciços e paredões foram feições mapeáveis através das imagens de satélites utilizadas. Os maciços (FIG. 5.3C) possuem simetria e dimensões de altura e largura variadas e sua ocorrência é pouco comum apenas na porção NW da área pesquisada. A referida área apresenta morfologia plana e é utilizada como aterro controlado pela Prefeitura Municipal de Diamantina. Os paredões ocorrem geralmente associados ao controle estrutural que contribui para o desenvolvimento destas feições. É comum o desenvolvimento de abrigos próximo aos paredões na área pesquisada (Fig. 5.3D).

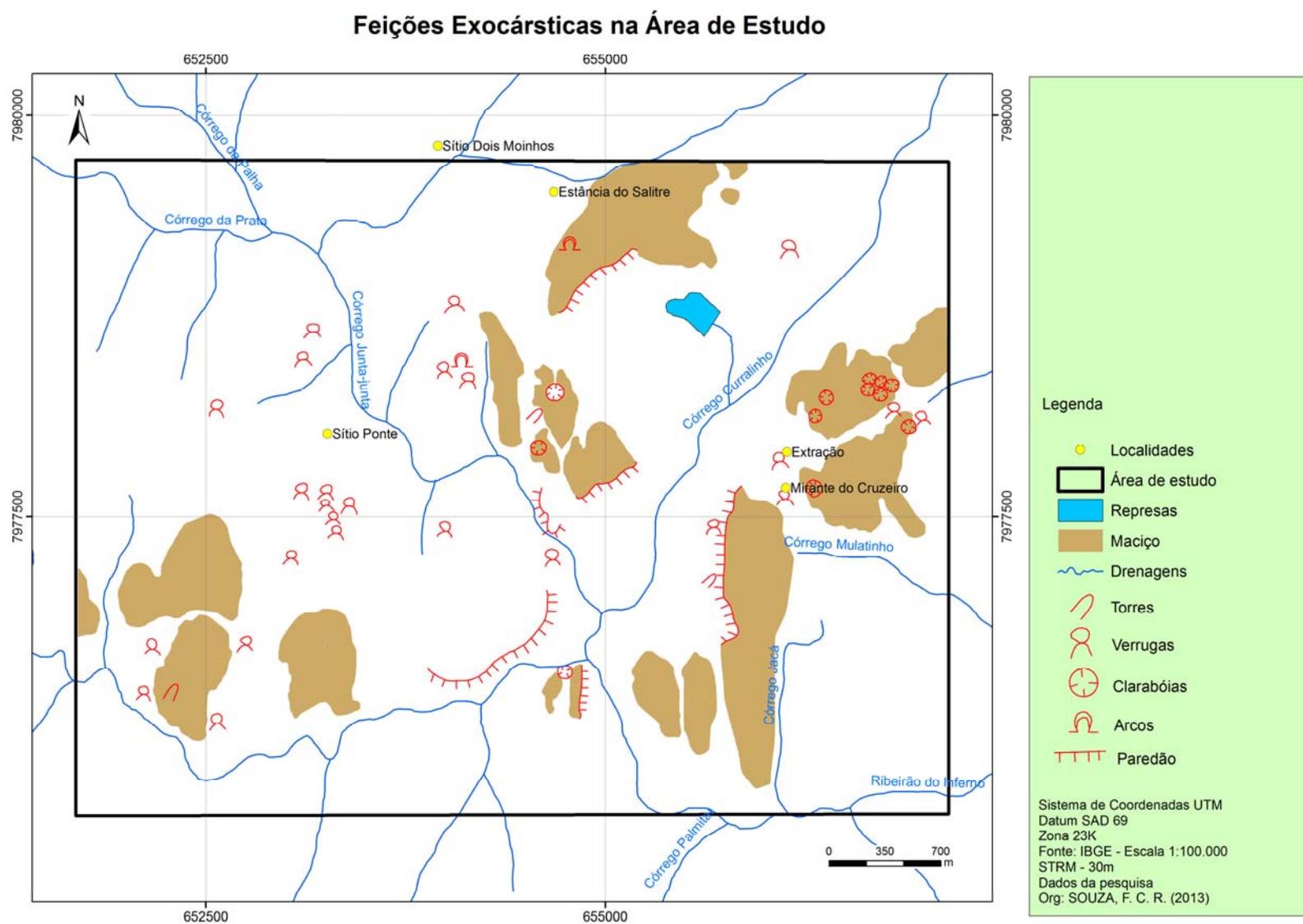


FIGURA 5.1 - Feições exocársticas na região SE de Diamantina

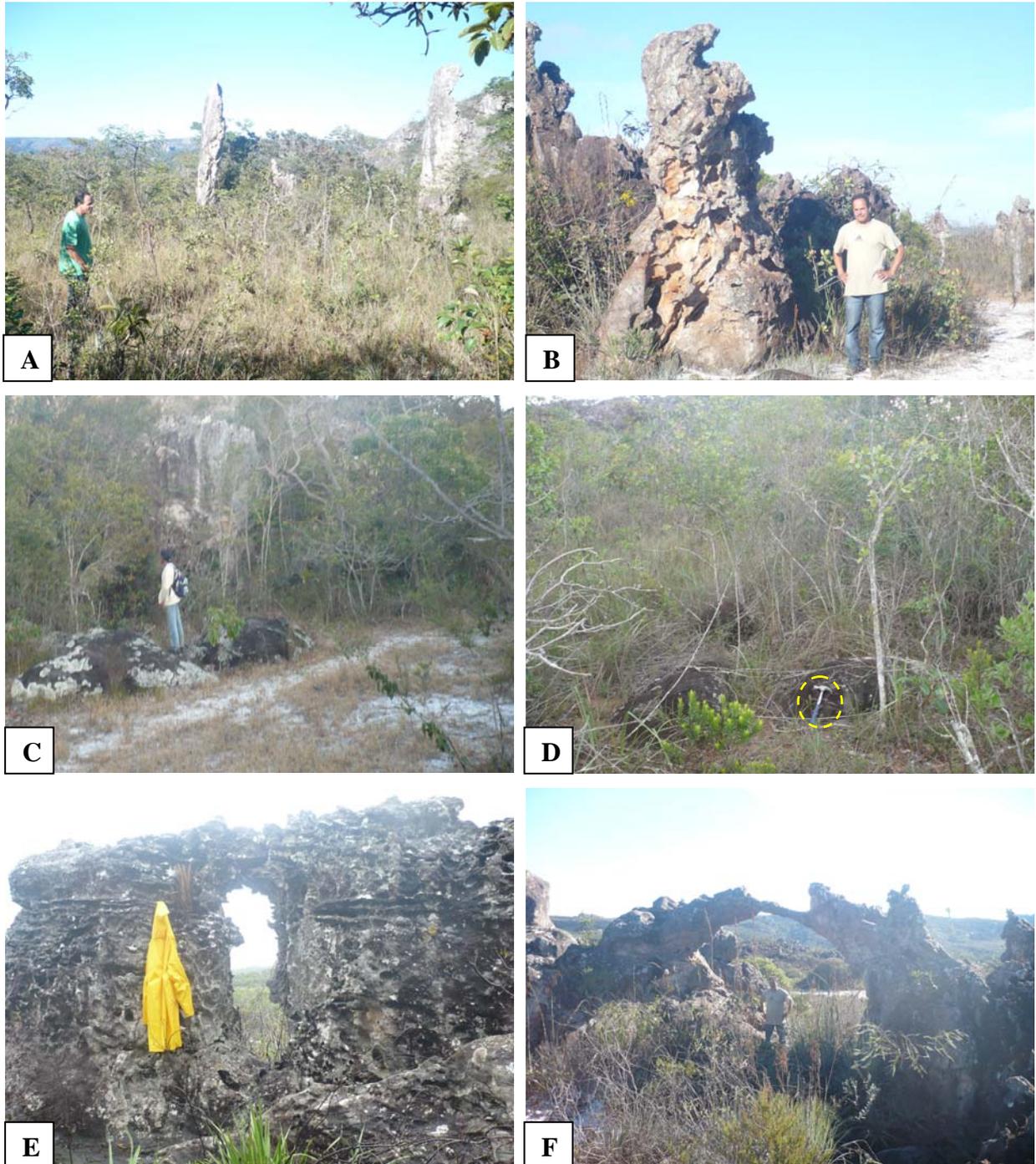


FIGURA 5.2 - Feições exocársticas residuais em quartzito na região SE de Diamantina. Torres (A e B); verrugas (C e D) e arcos (E e F).

Obs: Objeto amarelo em E corresponde a uma capa de chuva, tamanho “G” (comprimento: 115cm). Martelo: 31cm de comprimento.

Fotos: Souza, F. C. R.

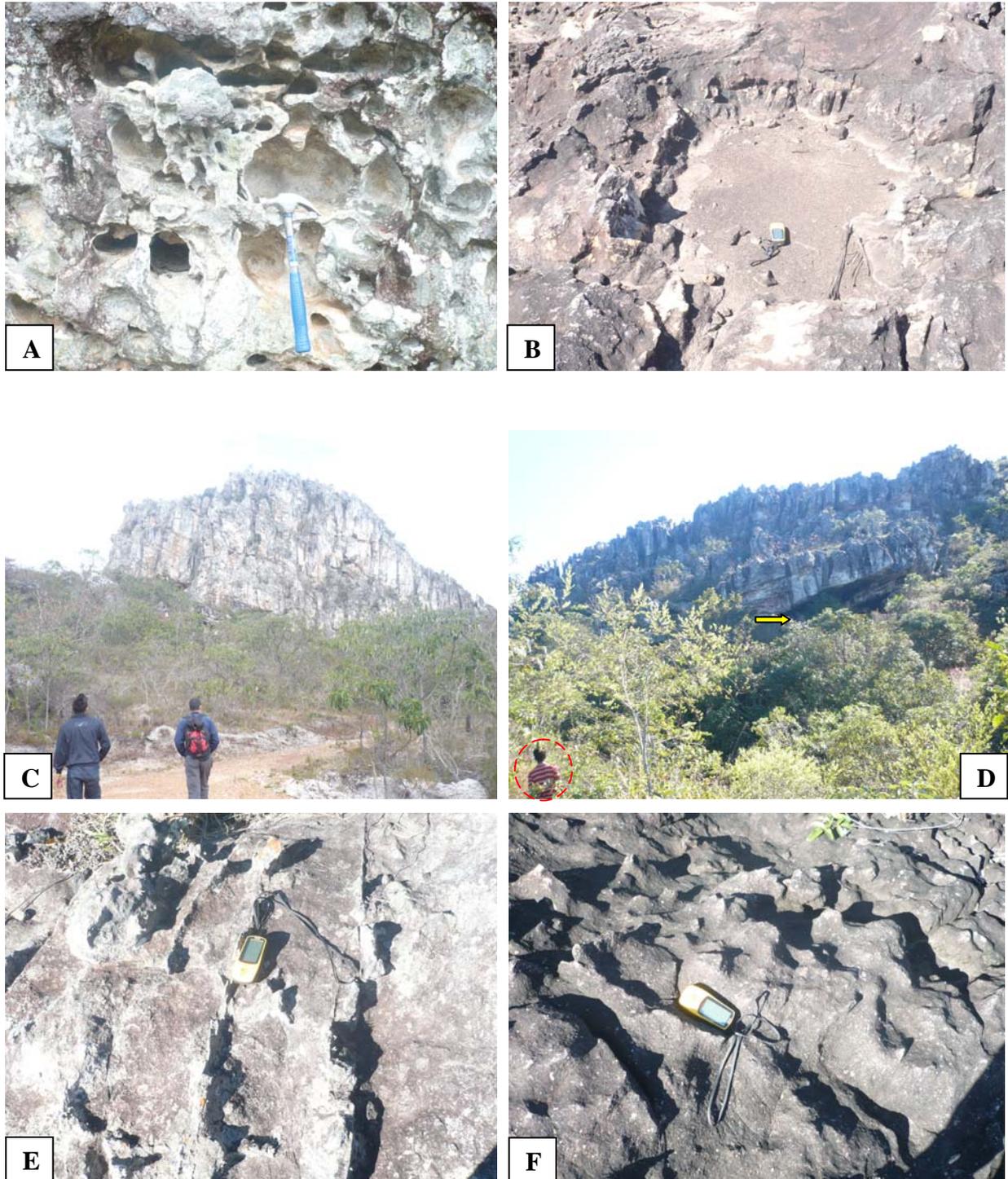


FIGURA 5.3 - Feições exocársticas em quartzito na região SE de Diamantina. Karren alveolares (*wall pockets*) (A); kamenitza (B); maciço (C); paredão com entrada de um abrigo (D); Karrens (E e F).

Obs: Seta amarela em F indica entrada de abrigo. GPS: 11,5cm de comprimento. Martelo: 31cm de comprimento.

Fotos: Souza, F. C. R.

As depressões de infiltração de fluxo concentrado ocorrem na forma de clarabóias³⁴ e dolinas, sendo que o potencial de ocorrência destas feições pode ser maior que o mapeado, porque as dimensões morfométricas possuem extensão média de um a três metros. Com isso, essas feições são identificadas apenas em campo. Além disso, as clarabóias ocorrem geralmente nos topo ou terço superior dos maciços, que geralmente possuem paredes sulcadas, o que dificulta o caminhamento e, conseqüentemente, restringe o mapeamento. As depressões mapeadas representam a densidade média de 0,48/km².

As dolinas (FIG. 5.4A e B) possuem morfologia côncava, limitada em uma borda por bloco, possuem forma planimétrica de semicírculo e extensão máxima de três metros no eixo menor de desenvolvimento. Foi mapeada apenas uma dolina com esta classificação, caracterizada pela presença de solo de textura argilosa, cor vermelha e espessura superior a um metro, conforme verificado através de tradagem. Essa cobertura pedológica pode estar associada ao escoamento de água concentrada de solos originados de rochas metabásicas presentes nas suas proximidades. Essa feição caracteriza-se por funcionar como ponto de captação pluvial, sendo comum a presença de água no seu interior nos meses de fevereiro e março.

Na área pesquisada foram identificadas dez clarabóias (FIG. 5.4C e D), que possuem aberturas com, em média, um metro de extensão, profundidade média de três metros, vertentes abruptas e possibilitam o acesso a cavidades, além de favorecerem para as trocas de energias entre as áreas superficiais e subterrâneas.

³⁴ Para este trabalho a denominação clarabóia corresponde à feição originada pelo abatimento do teto da cavidade e é caracterizada pelo comprimento da abertura ser menor que a profundidade e, portanto, não divide a cavidade em duas partes. A clarabóia se diferencia da dolina de abatimento porque esta possui comprimento da abertura maior que a profundidade e, conseqüentemente, segmenta a cavidades em duas partes, conforme a definição de Rubioli e Moura (2005).

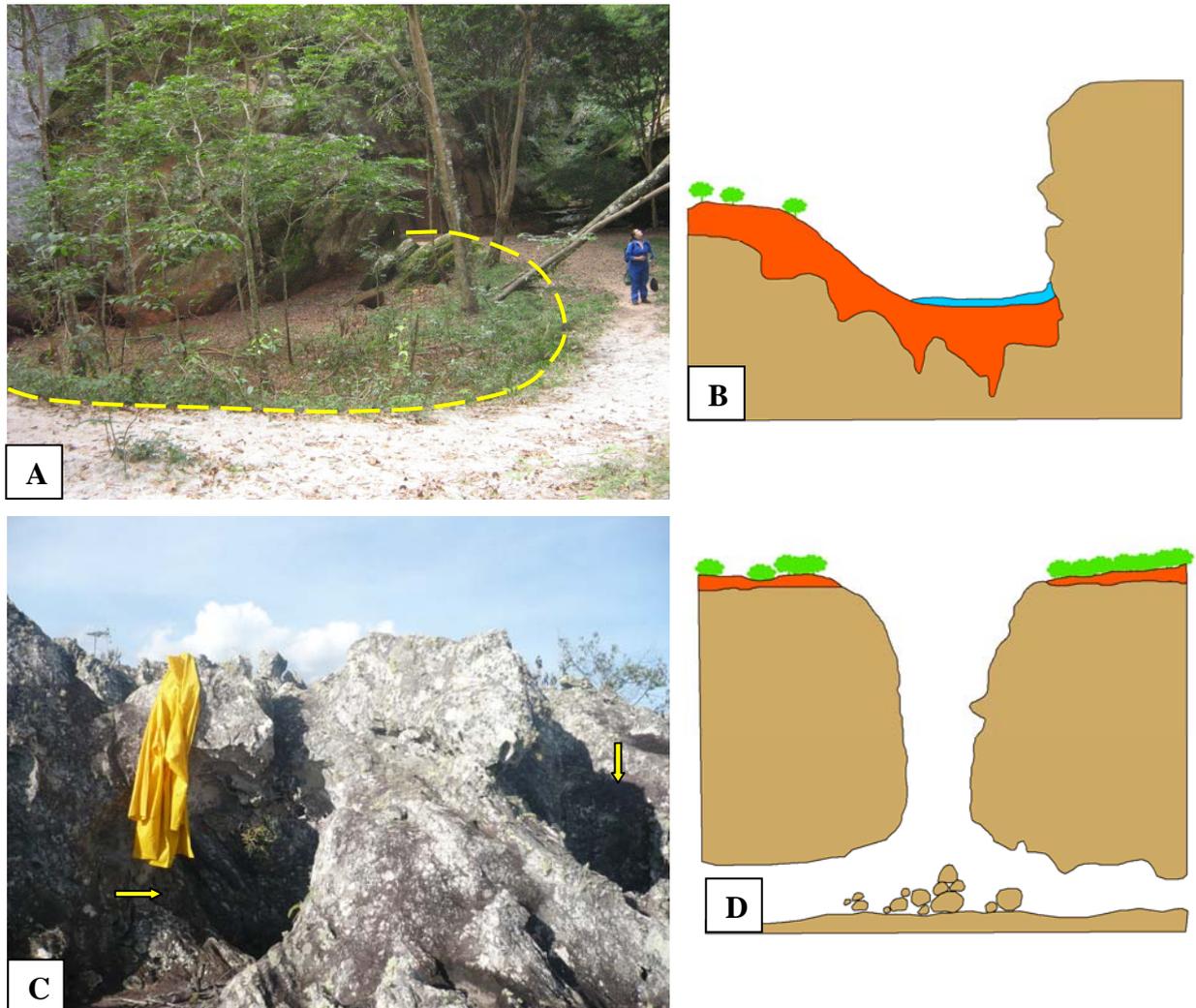


FIGURA 5.4 - Depressões de infiltração hídrica em quartzito na região SE de Diamantina. Dolina de dissolução (A); perfil da dolina de dissolução limitada por bloco de quartzito (B); Vista em superfície de entradas de clarabóias (C); perfil de clarabóia (D). Obs: Objeto amarelo em C, utilizado como escala, corresponde a uma capa de chuva, tamanho “G” (115cm de comprimento). Setas amarelas indicam as entradas das clarabóias. Fotos: Souza, F. C. R.

Algumas feições hidrológicas como sumidouros, surgências e ressurgências ocorrem na região SE de Diamantina (FIG. 5.5, 5.6 e 5.7), e possuem drenagens predominantemente intermitentes. A distância média entre os pontos de sumidouro e ressurgência varia entre 7 e 15 metros de extensão e ocorrem predominantemente na parte central da área de estudo.

A identificação destas feições foi realizada apenas em campo e acredita-se que o potencial de ocorrência seja superior ao mapeado. A densidade média de ocorrência de feições hidrológicas corresponde a $0,26/\text{km}^2$ (TAB. 5.1).

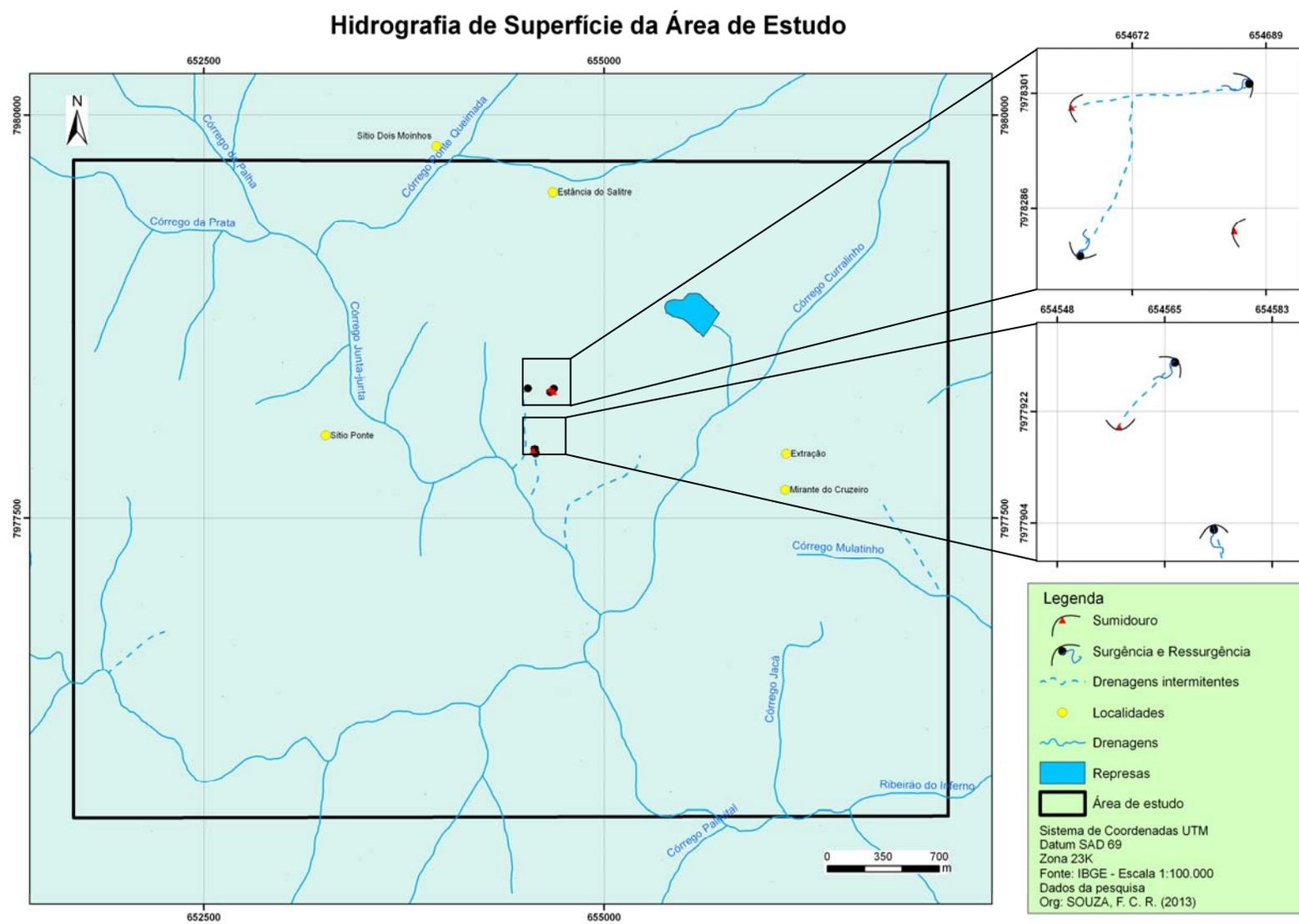


FIGURA 5.5 - Hidrologia de superfície na região SE de Diamantina



FIGURA 5.6 - Feições hidrológicas na região SE de Diamantina. Ressurgência perene (A); ressurgência intermitente (B) e surgência perene (C).

Obs: O tubo de PVC em B possui 50cm de comprimento.

Fotos: Souza, F. C. R. (A, C); Ferreira, D. R. (B).



FIGURA 5.7 – Ressurgência intermitente na área de estudo

Foto: Ferreira, D. R.

TABELA 5.1
Ocorrência de feições hidrológicas

Feições	Quant.	Densidade
Sumidouro	3	0,13/km ²
Surg. e ressurg.	3	0,13/km ²
Feições hidrológicas (total)	6	0,26/km ²

Fonte: Dados da pesquisa

5.1. Caracterização Geoestatística de Kamenitzas na Região Sudeste de Diamantina

Na área de estudo as kamenitzas são feições recorrentes, ocorrem geralmente diretamente sobre a superfície da rocha e estão distribuídas espacialmente em toda a área. O processamento dos dados morfométricos das kamenitzas permite constatar que a profundidade média das kamenitzas equivale a 17,38cm. A distribuição percentual destas feições com até 21cm de profundidade média é relativamente homogêneo, sendo que apenas 8% possui entre 31,6 e 42cm, que são as feições mais profundas (GRAF. 5.1).

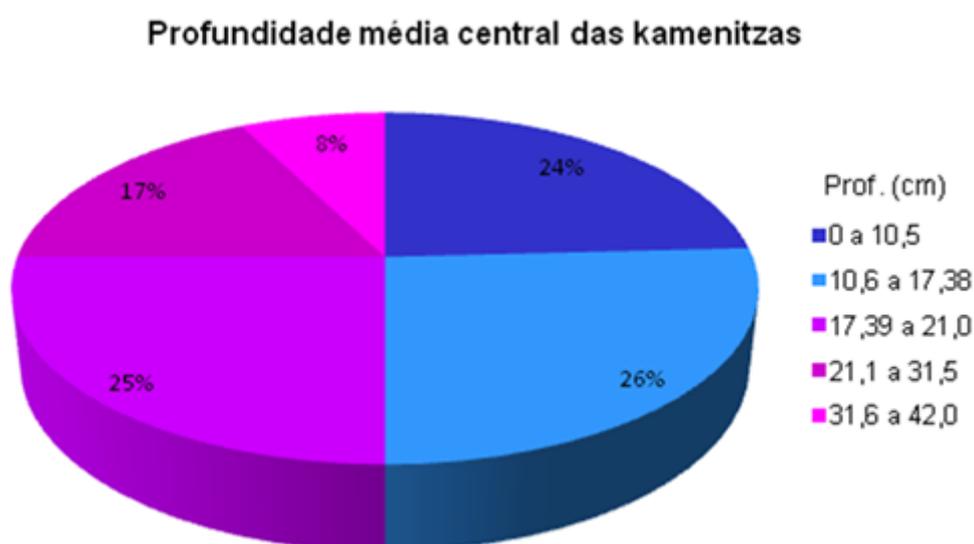


GRÁFICO 5.1 – Profundidade média central das kamenitzas (cm).

Em relação à extensão do eixo maior das kamenitzas, destaca-se que a média equivale a 100,72cm. A distribuição percentual destas feições com valores até o segundo quartil (146,5cm) é relativamente homogêneo, sendo que apenas 4% possui entre 219,8 e 293,0cm, que são as feições mais extensas (GRAF. 5.2). A respeito da extensão do eixo menor destas feições, nota-se que o valor médio equivale a 58,61cm e a maioria das feições possuem dimensões até 78,0cm (GRAF. 5.3). Esses dados permite constatar que, em geral, a maioria das kamenitzas possui valores que variam do valor mínimo ao segundo quartil no que diz respeito à profundidade central (2 a 21cm), extensão do eixo maior (30 a 146,5cm) e extensão do eixo menor (15 a 78,0cm), ou seja, predominantemente, as kamenitzas são pequenas e médias.

Extensão do eixo maior das kamenitzas

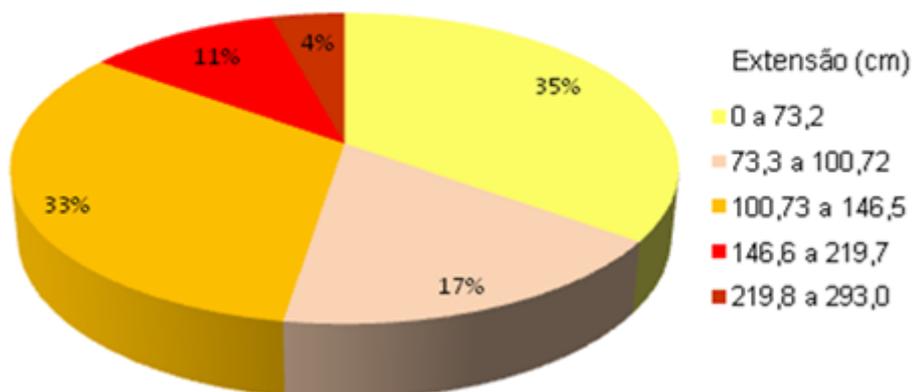


GRÁFICO 5.2 – Extensão do eixo maior das kamenitzas (cm).

Extensão do eixo menor das kamenitzas

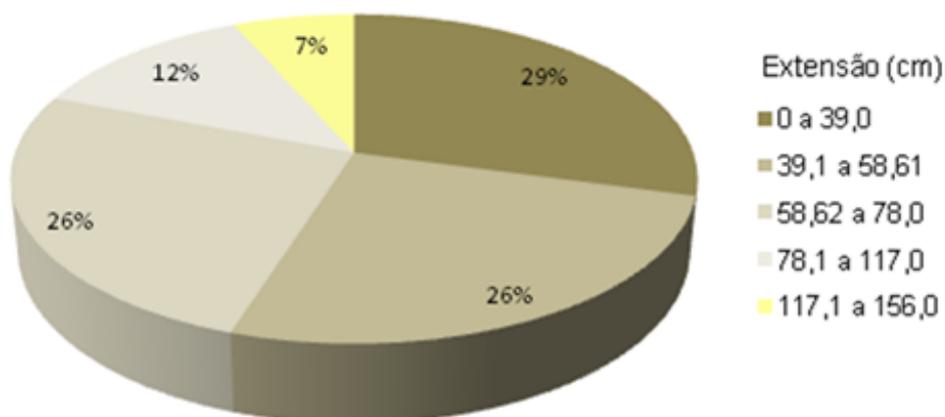


GRÁFICO 5.3 – Extensão do eixo menor das kamenitzas (cm).

A TAB. 5.2 registra os principais dados de estatística descritiva geral das kamenitzas amostradas. As informações estatísticas levantadas permitem interpretar o fator de dispersão morfométrica das kamenitzas em relação ao valor central³⁵ (média aritmética e mediana). O desvio padrão da profundidade média central (8,94) evidencia que a maioria das amostras possui profundidades próximas ao valor central e, portanto, a dispersão é baixa. O desvio padrão da extensão do eixo maior das kamenitzas (51,84) registra que, embora a margem de diferença seja baixa, a maioria das amostras possui valores dispersos. O desvio padrão da

³⁵ Essa análise é realizada a partir da interpretação do desvio padrão.

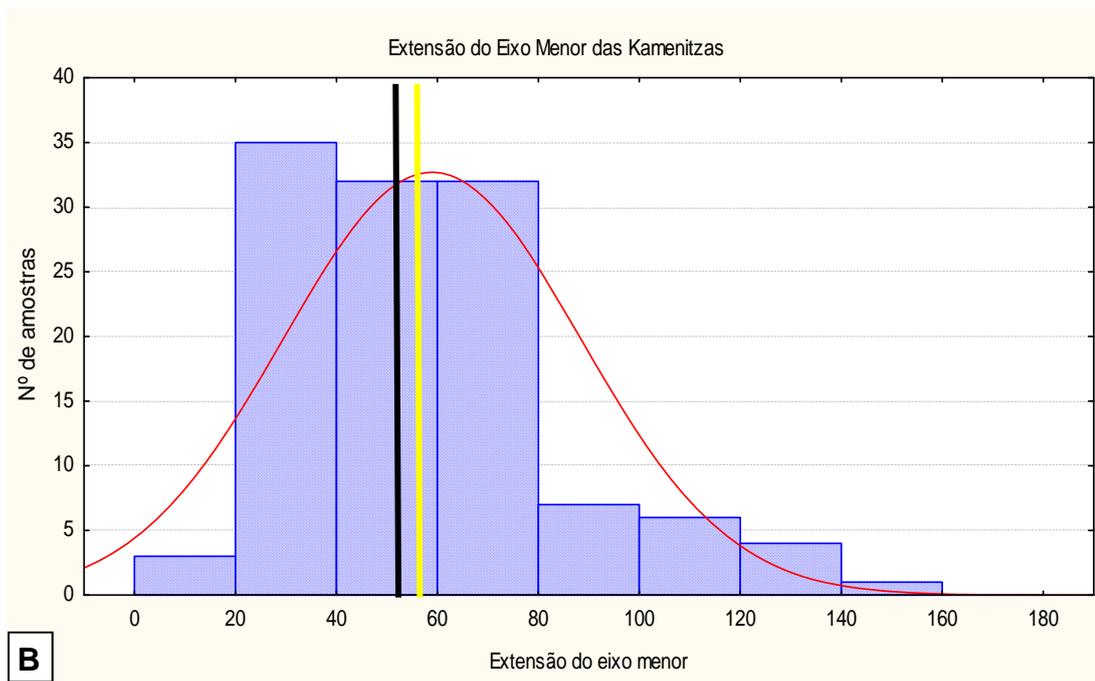
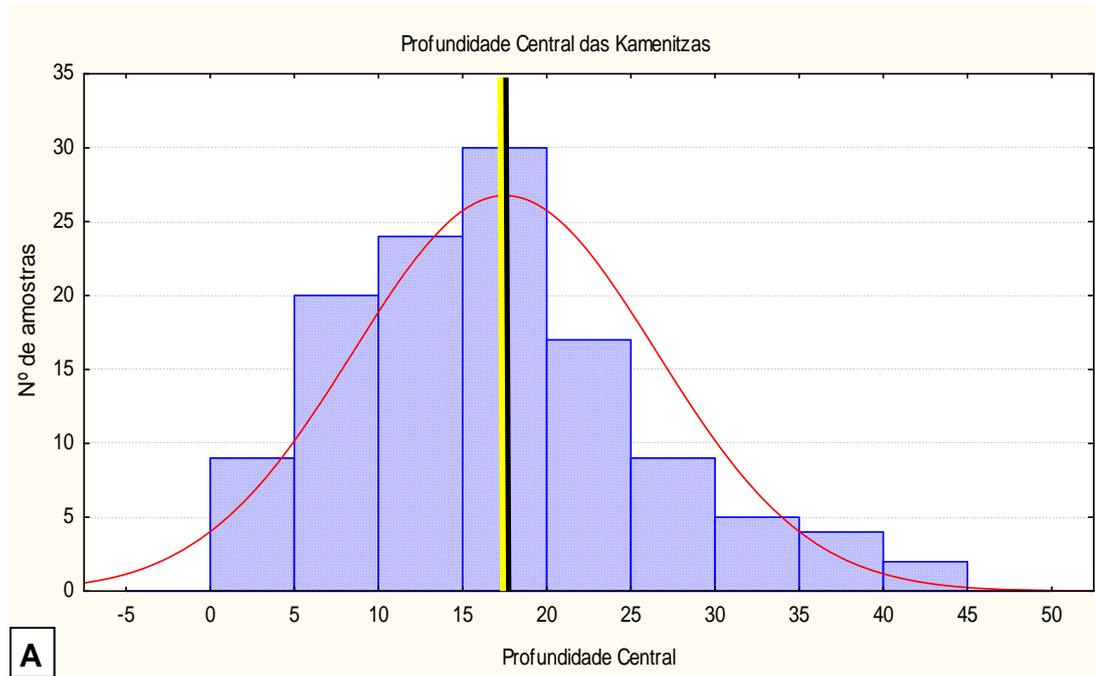
extensão do eixo menor (29,28) indica que a maioria das amostras possui valores próximos à média e mediana (TAB. 5.2).

TABELA 5.2

Estatística Descritiva Geral das Kamenitzas

	Prof. Central	Eixo maior	Eixo menor
Valor máximo	42	293	156
Valor mínimo	2	30	15
Média aritmética	17,38	100,72	58,61
Mediana	17,5	97,5	55
Desvio Padrão	8,94	51,84	29,28

Essas informações do fator de dispersão morfométrica dos parâmetros investigados são confirmados e reforçados nos GRAF. 5.4A, B e 5.5, que apresenta, respectivamente, os histogramas de frequência da profundidade média central, extensão do eixo menor e maior das kamenitzas amostradas na área de estudo. Os GRAF. 5.4A, B e 5.5 reiteram os dados que indicam que a menor proporção das kamenitzas possuem os maiores índices de profundidade central, extensão do eixo maior e menor. Os GRÁF. 5.4 e 5.5 também reafirmam que, em geral, a maioria dos valores de profundidade central e extensão do eixo menor das feições analisadas é próximo aos valores centrais (média aritmética e mediana), e há baixa dispersão dos valores de extensão do eixo maior das kamenitzas.



— Mediana
 — Média aritmética

GRÁFICO 5.4 - Histograma dos parâmetros morfométricos profundidade central (A) e extensão do eixo menor (B) das kamenitzas amostradas na área de estudo (cm).

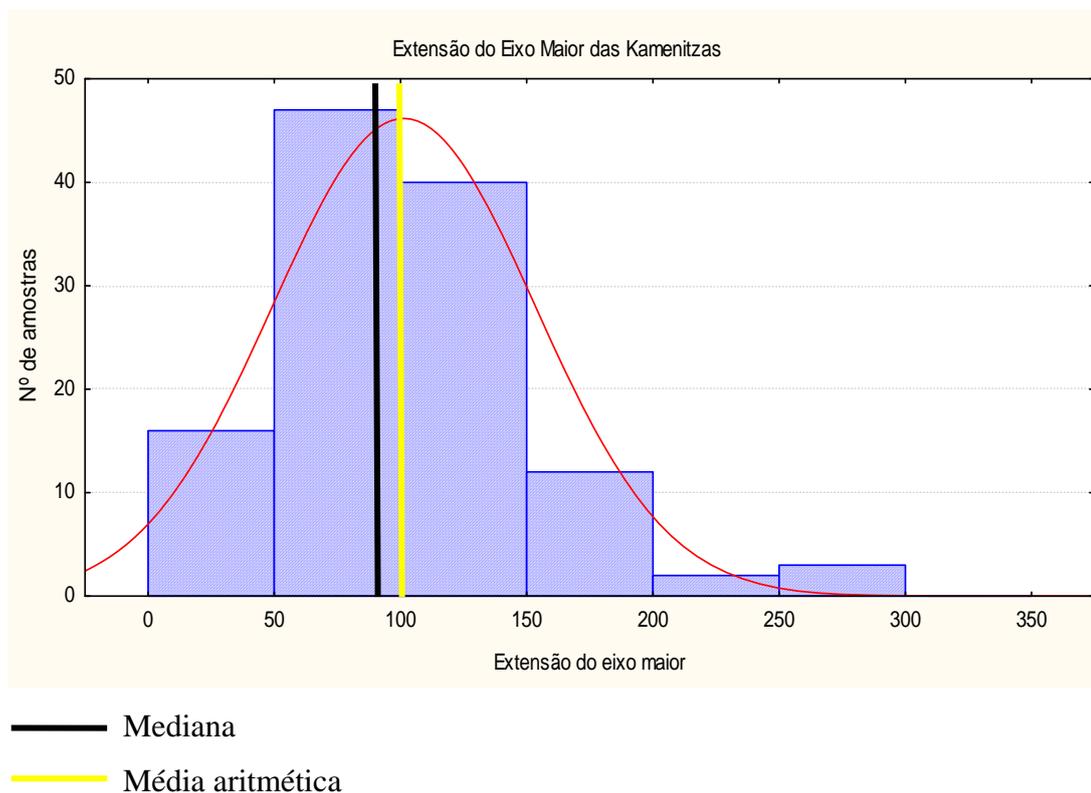


GRÁFICO 5.5 - Histograma do parâmetro morfométrico extensão do eixo maior das kamenitzas amostradas na área de estudo (cm).

O GRAF. 5.6 mostra a relação dos parâmetros profundidade média central e extensão do eixo maior e menor das kamenitzas com as cotas altimétricas onde elas estão inseridas. A extensão do eixo maior das kamenitzas, apesar de algumas exceções, é maior quando estão localizadas em áreas com altitudes de variam de 1100 a 1199m de altitude. Destaca-se também que locais com este intervalo altimétrico são predominantes na área pesquisada. A extensão do eixo menor, por sua vez, apresenta valores predominantemente homogêneos, independentemente da altimetria de inserção das kamenitzas. As feições analisadas tendem ser mais profundas quando desenvolvidas em áreas entre 900 e 999m de altitude. Já nas áreas entre 1100 e 1199m de altitude há variações nos índices de profundidade média central, mas salvo algumas anomalias, são predominantemente rasas (GRAF. 5.6).

Esses dados morfométricos indicam que, em geral, as kamenitzas desenvolvidas em áreas entre 900 e 999m de altitude apresentam morfologia predominantemente arredondada, devido à relativa pequena diferença entre as dimensões do eixo maior e menor de desenvolvimento destas formas; e também são as amostras mais profundas na área. Já as feições desenvolvidas em áreas entre 1100 e 1199m apresentam, em geral, morfologia alongada, são feições rasas e são as amostras mais extensas na área investigada. Ou seja, em síntese há duas tipologias morfológicas de kamenitzas: i) profundas, arredondadas e de

dimensões menores e ii) rasas, alongadas e de dimensões maiores. A FIG. 5.8 registra esses tipos de kamenitzas que ocorrem na área investigada.

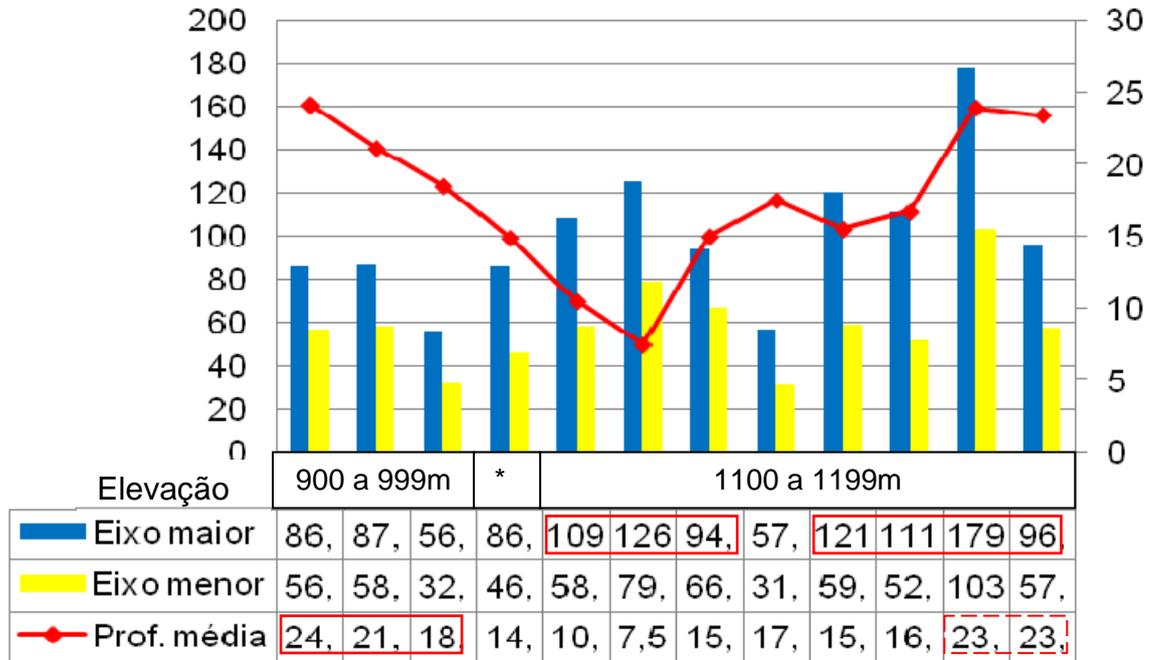


GRÁFICO 5.6 – Relação dos parâmetros profundidade média central, extensão do eixo maior e menor das kamenitzas (cm) com a elevação. *1000 a 1099m

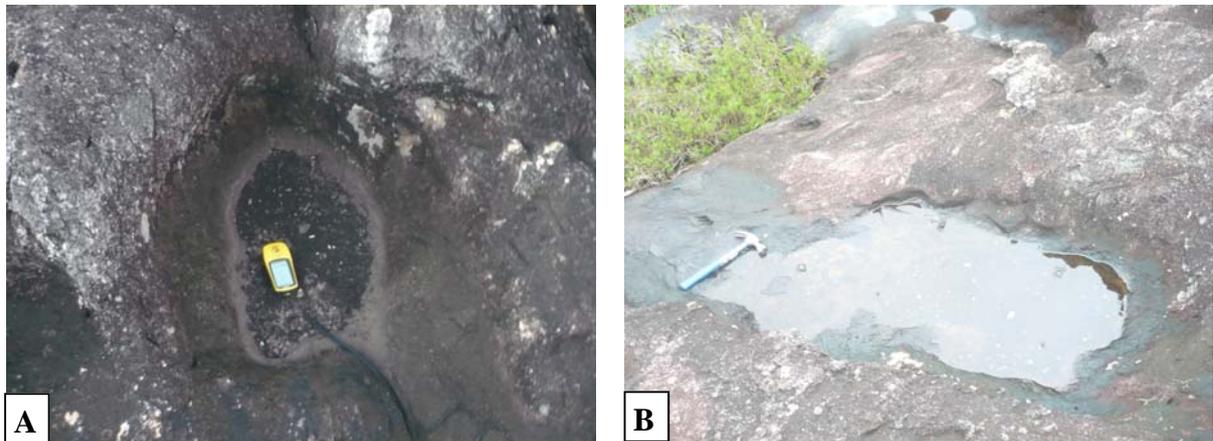


FIGURA 5.8 - Tipos de kamenitzas da área de estudo: A) profundas, arredondadas e de dimensões menores e B) rasas, alongadas e de dimensões maiores. GPS: 11,5cm de comprimento. Martelo: 31cm de comprimento Foto: Souza, F. C. R. (2012)

As FIG. 5.9, 5.10 e 5.11 apontam a distribuição espacial dos pontos amostrados com os respectivos valores da média aritmética da profundidade média central, extensão do eixo maior e do eixo menor, respectivamente. A FIG. 5.9 mostra a localização das kamenitzas mais

profundas e rasas, ela confirma a interpretação que a proporção de kamenitzas com as maiores dimensões são restritas e praticamente não há distribuição espacial concêntrica das kamenitzas conforme as suas dimensões. Quanto às dimensões da extensão do eixo maior de desenvolvimento das kamenitzas, destaca-se que as feições menores estão localizadas predominantemente na parte sul da área de estudo (FIG. 5.10). Em relação à extensão do eixo menor de desenvolvimento das kamenitzas, verifica-se que, em geral, elas possuem valores médios, mas também apresentam o seguinte comportamento: i) há dois pontos amostrais com índices menores na parte sul da área pesquisada e ii) um ponto na parte norte em que os índices são os mais expressivos (FIG. 5.11).

Levando em consideração as duas tipologias morfológicas de kamenitzas presentes na área de estudo e as informações presentes nas FIG. 5.9, 5.10 e 5.11 constata-se que, em termos gerais, a maior probabilidade de feições com extensões menores localiza-se na porção sul da área de estudo. Afinal, as feições com extensão do eixo maior com valores morfométricos menores geralmente corresponde ao com eixo menor com as menores dimensões, como pode ser observados nos pontos 3, 6, 10, 11 e 12. Além disso, esses pontos também apresentam geralmente indicadores profundos ou médios (FIG. 5.9, 5.10 e 5.11). Portanto, este indicador corrobora que as kamenitzas morfológicamente menores e arredondadas são mais profundas, salvo algumas exceções. Assim como demonstra que geralmente as kamenitzas com as maiores dimensões do eixo maior e menor de desenvolvimento, são feições com as menores profundidades, como registra os pontos 1, 2, 5 e 7. Ou seja, conforme a classificação espacial, em resumo, as feições profundas, arredondadas e de dimensões menores localizam-se predominantemente na parte sul da área de estudo e as kamenitzas rasas, alongadas e de dimensões maiores estão situadas principalmente na parte norte da região SE de Diamantina.

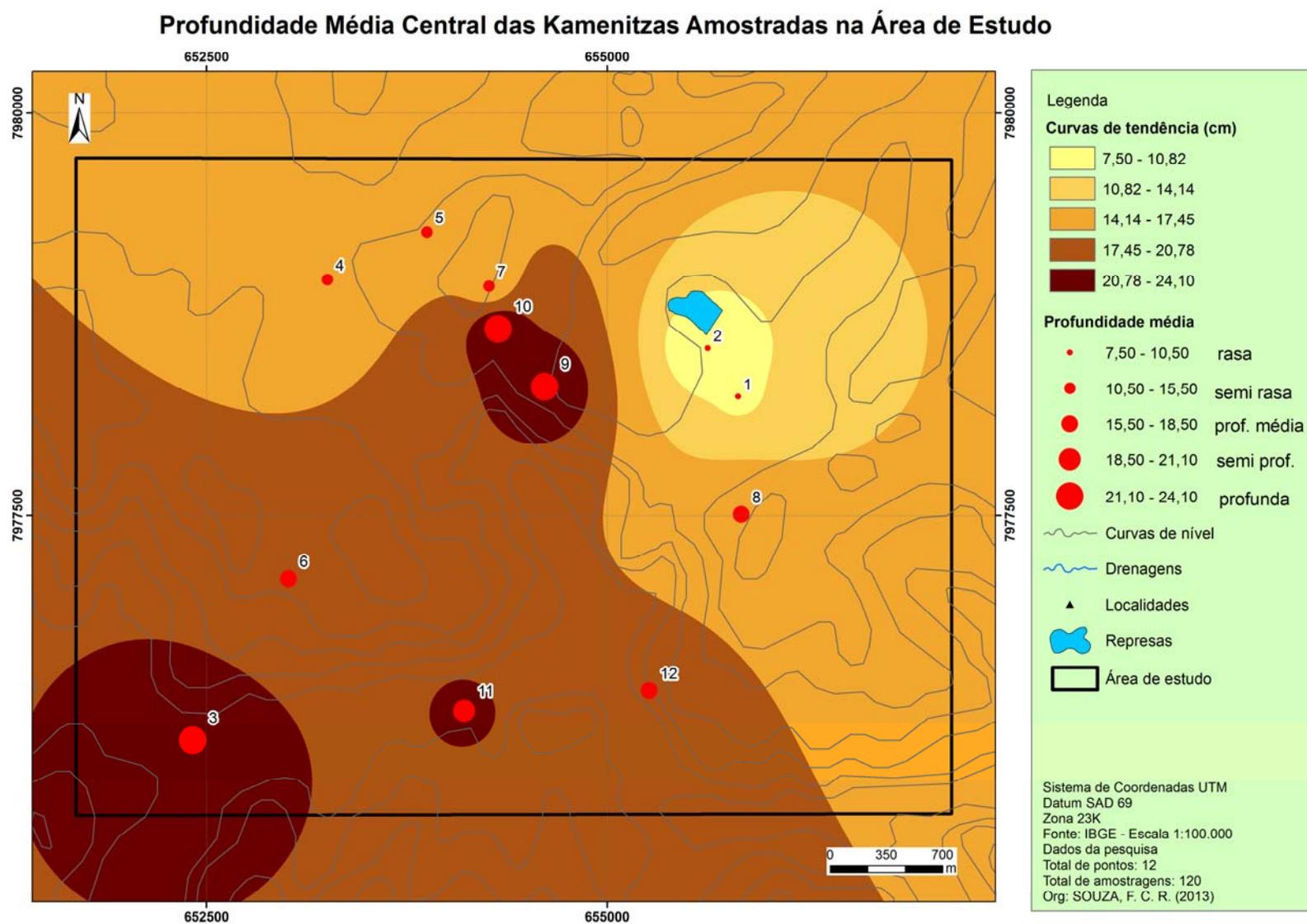


FIGURA 5.9 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a profundidade média central (cm) das kamenitzas.

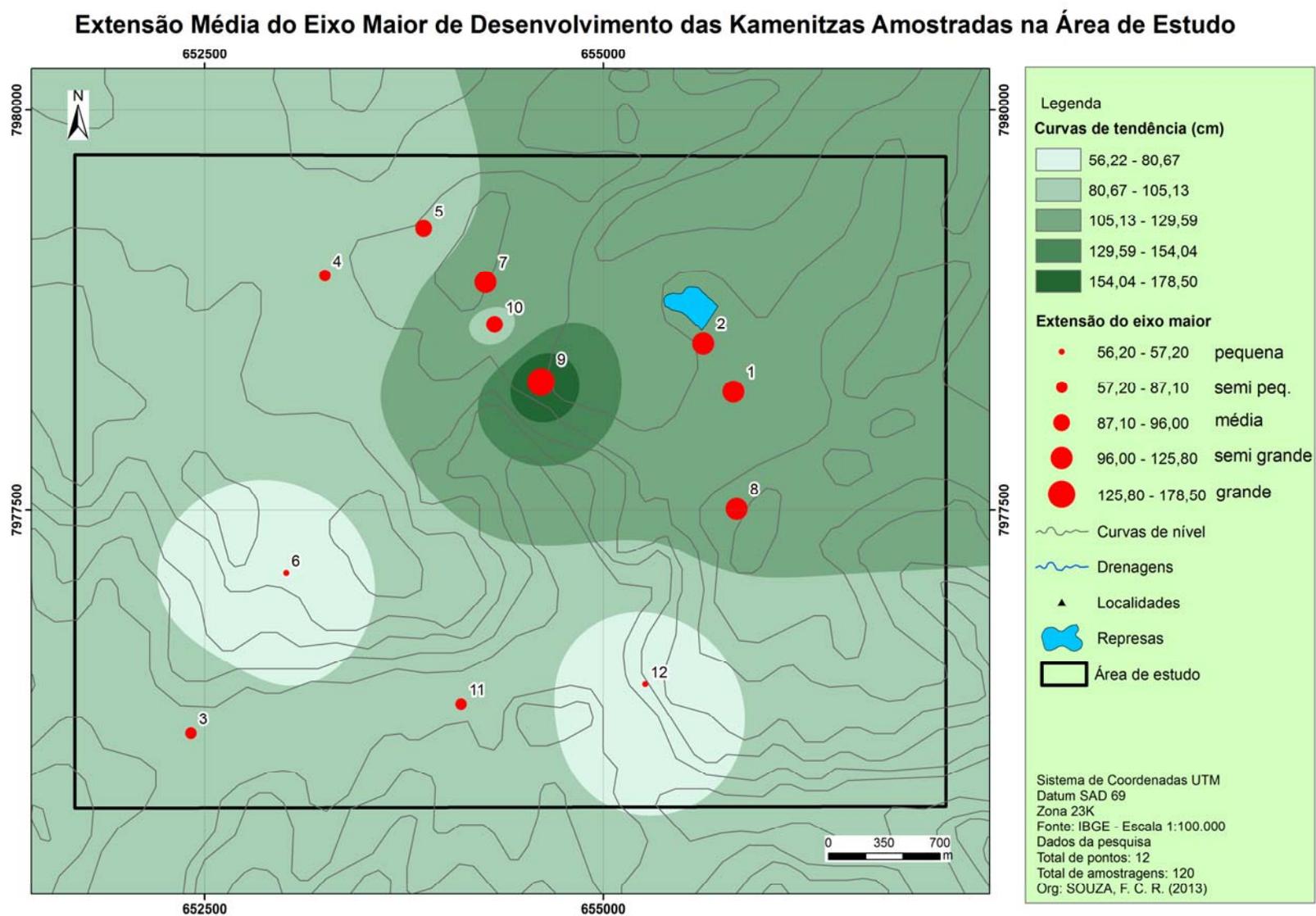


FIGURA 5.10 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a extensão média do eixo maior de desenvolvimento das kamenitzas.

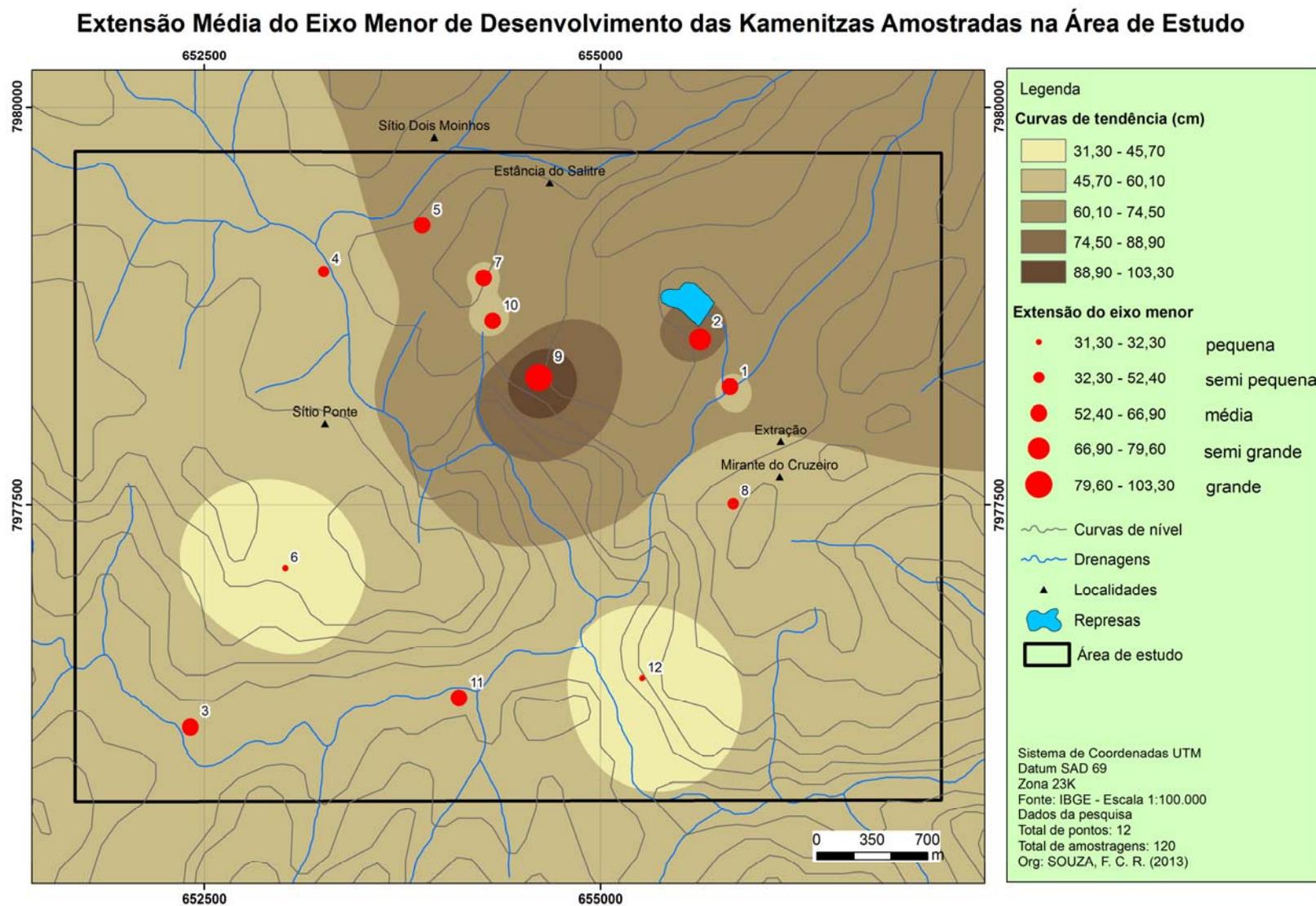


FIGURA 5.11 - Distribuição espacial dos pontos organizado conforme a extensão média do eixo menor (cm) de desenvolvimento das kamenitzas.

5.2. Discussões

Ford e Williams (2007) defendem que a dissolução de rochas siliciclásticas gera conjuntos de formas com várias escalas, desde karren a largas depressões fechadas, embora a formação de feições largas seja auxiliada por erosão mecânica. Os autores asseguram que as formas de dissolução em rochas siliciclásticas sejam encontradas predominantemente em regiões tropicais úmidas. Isso ocorre porque, embora se admita a ocorrência de karren em quartzitos e arenitos também em regiões frias, as condições ambientais das áreas tropicais úmidas são mais favoráveis à denução química se comparadas às áreas desérticas e glaciais.

Gilieson (1996) e Ford e Williams (2007) concordam que essas feições, embora sejam mais comuns em rochas carbonáticas, podem também ocorrer em outras litologias. Entretanto, apenas a presença de feições cársticas não implica conceituar uma área necessariamente como cárstica. Esta definição está relacionada ao estudo do relevo e dos processos associados ao seu desenvolvimento.

Neste sentido, constata-se que a área de estudo registra a presença de feições hidrológicas e exocársticas possui potencial de ocorrências superior ao mapeado. Assim, o adensamento das atividades de prospecção pode ampliar o número de feições hidrológicas, que até então foram mapeadas apenas na porção central da área pesquisada. Destaca-se que a relativa homogeneidade de distribuição das feições cársticas na área de estudo pode estar associada ao contexto estratigráfico local composto predominantemente por quartzito monomítico. Afinal, embora ocorram fácies de paraconglomerado e ortoconglomerado, suas ocorrências são pontuais e em alguns casos não apresenta contato em superfície, o que confere predominância de quartzito monomítico. Já as rochas básicas e metabásicas apresentam-se alteradas restringindo a formação de feições exocársticas em superfície.

Entretanto, a densidade de ocorrência destas feições é inferior ao identificado em áreas de litologia carbonática, devido à composição química e mineralógica destas rochas favorecer a maior rapidez na dissolução do Ca em detrimento ao Si. Afinal, ao analisar a energia³⁶ necessária para a formação de cátions e dos minerais primários silicatados apresentada por Keller (1968), percebe-se que os minerais silicatados apresentam as maiores forças de ligação interna para formar suas estruturas e essas energias são mais de três vezes superior à força de ligação do Ca^{2+} (principal componente das rochas carbonáticas). Ford e Williams (2007) apresenta as taxas de solubilidade de alguns minerais em condições ambientais de 25°C e

³⁶ Essa energia está relacionada à força de ligação entre os elementos químicos que formam o mineral.

pressão atmosférica de 1 bar (105 Pa) e acrescentam que, nestas condições ambientais, a solubilidade quartzo é 12mg/l, a sílica amorfa é 120mg/l e calcita varia de 60 a 400mg/l.

Assim, pode-se realizar a correlação das dolinas de dissolução, sumidouros e ressurgências da área de estudo com as identificadas em outras áreas. A densidade de ocorrência de dolinas de dissolução na área estudada (0,04/km²) é baixa se comparado ao identificado no vale do rio Paraíba do Sul/MG, que equivale a 9,1/km² (Uagoda *et al.*, 2011). A correlação da ocorrência destas feições com as encontradas em áreas de litologia carbonática, como a região de Lagoa Santa/MG, comprova que a densidade (18,9/km², conforme Piló (1998) destas feições em rochas carbonáticas é expressiva. Além disso, registra que a frequência³⁷ dessas feições em Lagoa Santa é 2,08 vezes superior ao encontrado no vale do rio Paraíba do Sul e 472,5 vezes superior ao identificado na área de estudo. Os dados de quantidade e densidade das dolinas de dissolução estão registrados na TAB. 5.3.

TABELA 5.3
Ocorrência de feições dolinas de dissolução

Região	Quantidade	Densidade
Região SE de Diamantina/MG	01	0,04/km ²
Vale do Rio Paraíba do Sul/MG	125	9,1/km ²
Lagoa Santa/MG	97	18,9/km ²

Fonte: Dados da pesquisa, Uagoda *et al.* (2011), Piló (1998)

As diferenças registradas na densidade de dolinas de dissolução na área de estudo e no vale do rio Paraíba do Sul pode estar associado a diferenças na composição química e mineralógica dos quartzitos de ambas as regiões. Porém como Uagoda *et al.* (2011) apenas mencionam a presença de quartzitos puros e impuros, mas não informa o tipo, quantidade e concentração das impurezas, não é possível fazer uma correlação direta entre as duas áreas em termos de composição mineralógica. A diferença observada entre a densidade de feições em áreas carbonáticas e quartzíticas, entretanto, está relacionada à composição química das rochas.

Destaca-se que a densidade das feições hidrológicas identificadas até o momento (0,26/km²) é restrito se comparado com áreas carbonáticas. Devido à localização da área está inserida na parte central do Planalto Diamantina, observa-se que esta recebe apenas contribuição de drenagem autóctone e esta condição provavelmente predominou anteriormente na escala geológica local. Uagoda *et al.* (2011) registram a ocorrência de sumidouros e ressurgências no vale do rio Paraíba do Sul e a densidade dessas feições

³⁷ Esse dado foi obtido através da divisão da densidade obtida em Lagoa Santa (n/km²) pela densidade de feições obtido nas outras áreas investigadas (n/km²).

equivale a $0,06/\text{km}^2$ (TAB. 5.4). Portanto, a área de estudo apresenta uma densidade mais elevada destas feições se comparada ao vale do rio Paraíba do Sul. Os conhecimentos obtidos em ambas as áreas não permite, até o momento, o levantamento de hipóteses que justifiquem as razões dessas diferenças, visto que dados sobre composição mineralógica e influências alóctones, se existir, são importantes na interpretação de feições hidrológicas em ambos os casos.

TABELA 5.4
Ocorrência de feições hidrológicas

Feições	Região SE de Diamantina/MG		Vale do rio Paraíba do Sul/MG	
	Quantidade	Densidade	Quantidade	Densidade
Sumidouro	3	$0,13/\text{km}^2$	2	$0,03/\text{km}^2$
Surg. e ressurgências	3	$0,13/\text{km}^2$	2	$0,03/\text{km}^2$
Feições hidrológicas (total)	6	$0,26/\text{km}^2$	2	$0,06/\text{km}^2$

Fonte: Dados da pesquisa, Uagoda *et al.* (2011)

Conforme Ford e Williams (2007), em geral, as paisagens quartzíticas possuem algumas similaridades morfológicas com zonas áridas de paisagens carbonáticas. Essa similaridade ocorre porque a baixa solubilidade do quartzito, inerentes a este tipo de rocha, devido a sua composição química e mineralógica, pode ser compensada pela baixa precipitação e umidade relativa do ar nos desertos com calcários, que inibe o desenvolvimento das feições neste tipo de rocha.

A interpretação geoestatística das kamenitzas permite constatar que as características morfométricas destas feições são recorrentes na área pesquisada. Conforme Cvijic (1960) Sweeting (1972) e Bögli (1978), os principais fatores que interferem na formação das kamenitzas são: a) a composição da rocha; b) a quantidade, distribuição e natureza da precipitação; c) a declividade ou mergulho da rocha e suas estruturas primárias e secundárias; d) a presença ou ausência de cobertura vegetal, solos ou turfas; e) as condições paleoclimáticas. A TAB. 5.5 apresenta as características gerais das kamenitzas e suas principais superfícies de ocorrência.

TABELA 5.5
Características gerais das kamenitzas e suas áreas de ocorrência

Tamanho médio	Áreas de ocorrência	Superfície de ocorrência	Características das Cristas
<u>Diâmetro:</u> Poucos cm a 3m <u>Profundidade:</u> 50cm	Afloramentos ou superfícies livres e áreas com coberta pedológica	Horizontal	Semi afiadas onde os karren são livres Suavizadas onde os karren são cobertos

Fonte: Modificado de Sweeting (1972)

Na área de estudo, as kamenitzas ocorrem geralmente diretamente em afloramentos. Em termos gerais, considera que as condições ambientais locais caracterizadas por precipitações pluviométricas médias anuais (1400mm) e o relevo ondulado a suave ondulado podem ser fatores que favorecem o desenvolvimento as kamenitzas na área de estudo. Devido às condições ambientais locais favorecerem predominantemente a presença de afloramentos ou solos rasos (NEOSSOLOS Litólicos ou Quartzarênicos) o tipo de vegetação, predominante, é campos rupestres ou campos de altitude, embora ocorram áreas com campo sujo onde há solos originados de rochas metabásicas. Devido a essas condições pedológicas e ao tipo de vegetação, observa-se que esses são os motivos pelos quais a maioria das kamenitzas ocorre em áreas de afloramento, diretamente sob a superfície da rocha.

O estudo geoestatístico das kamenitzas permite apresentar as características gerais das kamenitzas na área de estudo e, devido à existência de poucos estudos morfométricos sobre estas feições, especialmente em rochas siliciclásticas, não é possível correlacioná-las com as identificadas em outras áreas. O Quadro 5.2 sintetiza as principais características morfológicas dos dois tipos de kamenitzas presentes na área de estudo.

QUADRO 5.2

Características das kamenitzas da área de estudo

	Tipos morfológicos das kamenitzas	
	Profundas, arredondadas e de dimensões menores	Rasas, alongadas ou ovais e de dimensões maiores
Altimetria de ocorrência mais comum	entre 900 e 999m	entre 1100 e 1199m
Localizam espacial de ocorrência	Sul da área de estudo	Norte da área de estudo
Tipologia das cristas	Suave	Suave

Portanto, a falta de estudos mais aprofundados sobre o carste em quartzitos, em geral, e sobre o contexto geográfico local limita a interpretação dos fatores que condicionam essas variações de densidade das feições mapeadas. Além disso, a identificação destas feições evidencia que a área investigada apresenta características específicas e requer estudos aprofundados direcionados a interpretar os processos diretamente envolvidos na sua elaboração.

6. CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS FEIÇÕES ENDOCÁRSTICAS

Os primeiros trabalhos sobre as feições endocársticas na região SE de Diamantina correspondem aos estudos do IBGE (1939), que apresenta a identificação e descrição geral da Gruta do Salitre. Em 1978 a Sociedade Excursionista Espeleológica/ Escola de Minas (SEE/EMM) publicou a topografia expedita da Gruta do Salitre, executada através do Projeto Grutas. Posteriormente foram executados trabalhos de descrição geral por Genser e Mehl (1977), Brichta *et al.* (1980), Willems *et al.* (2008) e Stávale (2012) desta mesma cavidade e, por fim, Azevedo e Araújo (2011) discutem sobre o processo de gestão de uso público desta cavidade. O banco de dados do CECAV registra a existência de duas cavidades (Gruta do Salitre e Gruta Monte Cristo), porém não foram publicados até o momento estudos que envolvessem a identificação ou descrição de outras cavidades na área pesquisada.

Em trabalhos de campo foram identificadas dez cavidades e 32 abrigos³⁸, sendo que foram selecionadas sete cavidades para interpretação e estas representam 70%³⁹ do universo prospectado. Os critérios utilizados para a seleção das sete cavidades incluem: a) ocorrência de processos hidrológicos; b) presença de depósitos químicos; c) projeção horizontal superior a 5m⁴⁰. A FIG. 6.1 demonstra a localização espacial das cavidades e abrigos identificados.

Registra-se que não foram identificadas a presença de grafismos rupestres ou vestígios de cerâmica, louça e materiais líticos pré-históricos em superfície, mas apenas cerâmica histórica em uma cavidade. Entretanto, observações de trabalhos de campo demonstram a existência de manifestações pré-históricas, especialmente através de grafismos rupestres nas proximidades da área de estudo (distrito de Vau, Senador Mordestino e região oeste de Diamantina), porém as razões da ausência destes registros não fazem parte do escopo deste estudo.

³⁸ O CECAV (2011) apresenta as diferenças de classificação entre abrigo, abismo e caverna no Projeto Inventário Anual do Patrimônio Espeleológico Nacional. Segundo o CECAV (2011) quando a altura da entrada da cavidade é maior que o seu desenvolvimento trata-se de um abrigo. No entanto, quando a altura da entrada é menor que o desenvolvimento linear da cavidade trata-se de uma caverna. Já o abismo é definido quando o desenvolvimento da cavidade é predominantemente vertical.

³⁹ Para este cálculo estão sendo consideradas apenas as cavidades, visto que a legislação vigente não menciona o termo abrigo na definição de cavidades naturais subterrâneas, embora este trabalho reconheça, em termos gerais, a importância arqueológica e biológica deste tipo de feição.

⁴⁰ Considera-se que as cavidades com projeção horizontal inferior a 5m possuem importância bioespeleológica e contribuem para a compreensão dos processos genéticos. Entretanto, para o desenvolvimento desta pesquisa definir critérios de seleção, por isso utilizou-se os atributos legais para licenciamento de cavidades em cavidades desenvolvidas em rochas não carbonáticas.

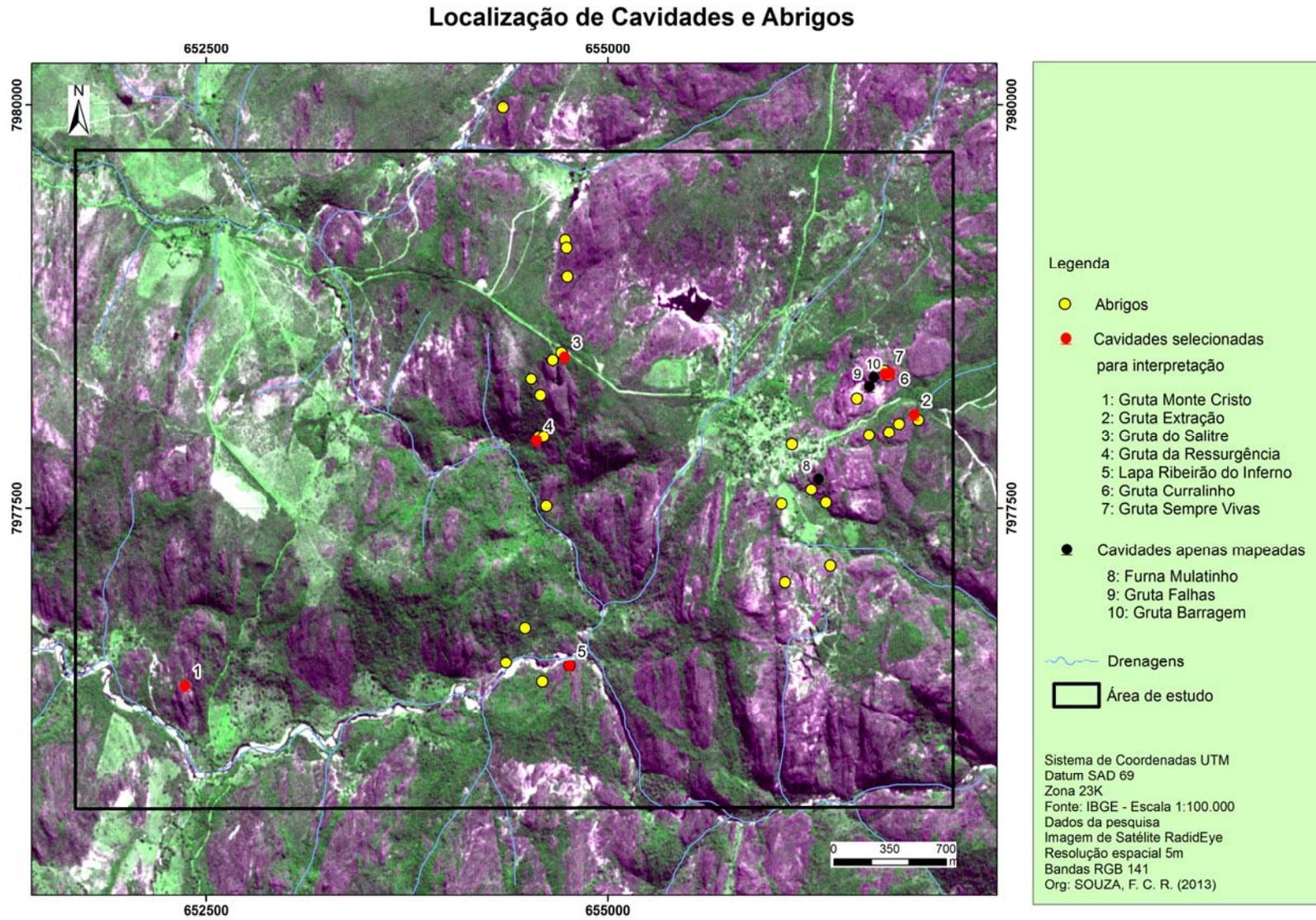


FIGURA 6.1 - Localização das feições endocársticas identificadas na região SE de Diamantina

Destaca-se que é comum encontrar abrigos, que tenham registros de usos residenciais (FIG. 6.2) associados à mineração de diamante. Além disso, as cavidades são utilizadas para visitação turística e práticas de esportes.

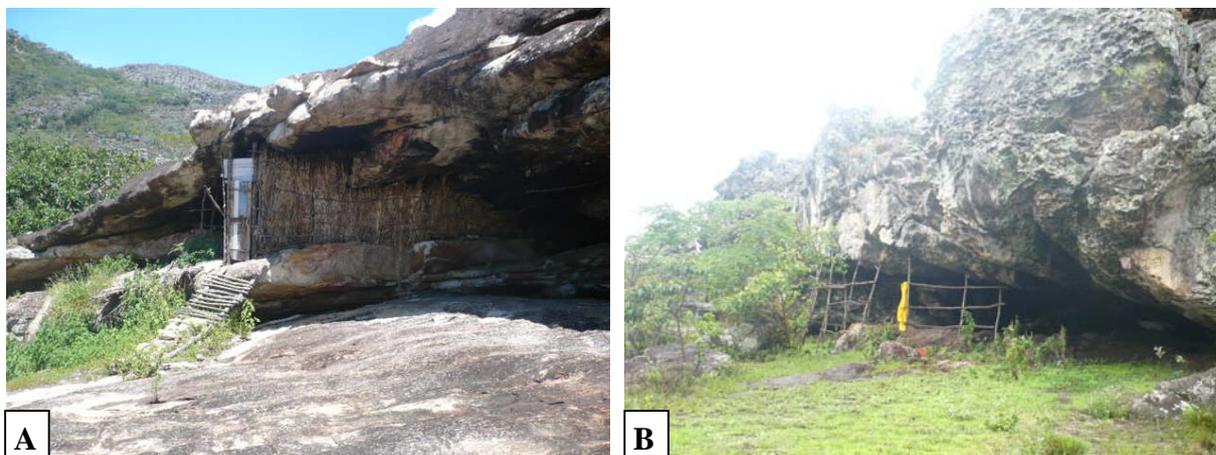


FIGURA 6.2 - Vestígios de uso dos abrigos para moradia. A: uso de palha, próximo ao Ribeirão do Inferno. B: uso de estacas de madeira, a mancha em amarelo corresponde a uma capa de chuva tamanho “G”, que possui 115cm de comprimento.
Fotos: Souza, F. C. R. (2012)

6.1. Contextualização Geral de Inserção Geográfica das Cavidades

As cavidades selecionadas para compor o universo amostral da região SE de Diamantina foram caracterizadas conforme os indicadores geomorfológicos, como o tipo de relevo, declividade, inserção das cavidades na vertente e segundo as cotas altimétricas. A maioria (71% ou 5) das cavidades está inserida em áreas de declividade entre 8 e 20%, que corresponde a relevo ondulado; e 29% das cavidades localizam-se em áreas de relevo suave ondulado, onde a declividade oscila entre 3 e 8% (GRAF. 6.1). Estes dados registram informações concordantes com o contexto geomorfológico da parte central do Planalto Diamantina e evidenciam que quanto maior a declividade, maior é a probabilidade de desenvolvimento de cavidades na área pesquisada.

A classificação das cavidades, conforme a sua inserção altimétrica registra que 29% das cavidades pesquisadas localizam-se entre 900 e 1000 metros de altitude, 14% situam-se entre 1001 e 1100m, 14% desenvolveram entre 1101 e 1200m e 43% encontram-se entre 1201 e 1250m de elevação (GRAF. 6.2). Constata-se, portanto, que apesar da pouca variabilidade entre o número de cavidades e a altimetria em que estão inseridas, as áreas topograficamente

mais elevadas são favoráveis ao desenvolvimento das cavidades e possibilita o maior número de cavidades nesta área.

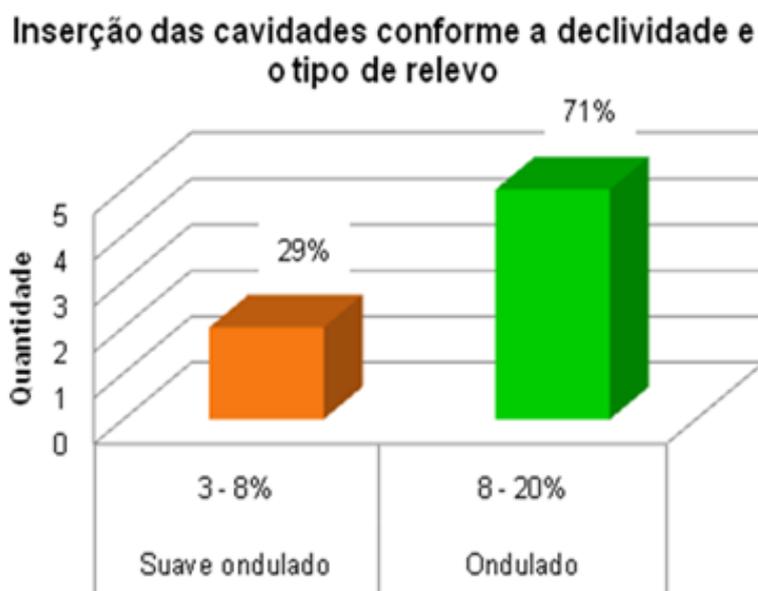


GRÁFICO 6.1 - Inserção das cavidades conforme o tipo de relevo e a declividade⁴¹

Inserção das cavidades conforme a altitude

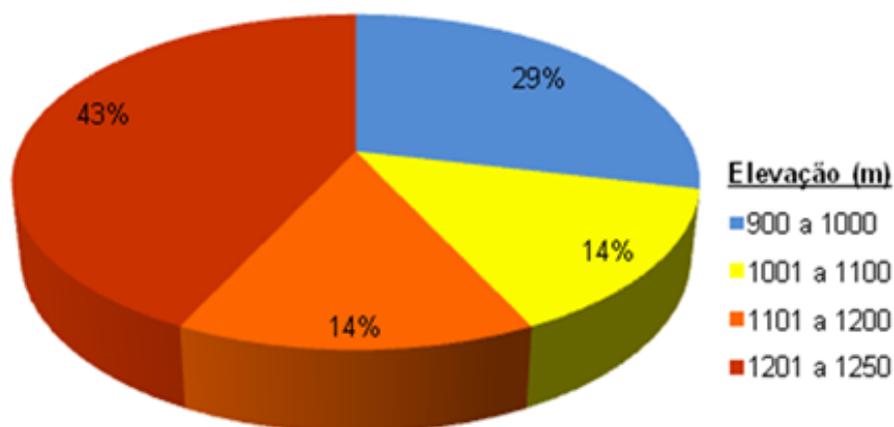


GRÁFICO 6.2 - Inserção das cavidades conforme a altitude

Em relação à inserção das cavidades na vertente côncava (GRAF. 6.3), percebe-se que 57,14% das cavidades localizam-se no topo, 28,57% situam-se no terço superior, 14,29% situam-se no terço superior da vertente. Logo, as áreas de topo favorecem o desenvolvimento de maior número de cavidades na área investigada. Este indicador é predominantemente concordante com os dados de altimetria, ou seja, com exceção de uma cavidade, as demais

⁴¹ Neste trabalho utiliza-se a classificação da declividade e tipo de relevo definida por Santos *et al.* (2005).

que estão inseridas no topo possuem elevações acima de 1000m (QUADRO 6.1). O QUADRO 6.1 sintetiza a relação entre cavidades pesquisadas e suas características de inserção na paisagem, conforme os indicadores geomorfológicos.

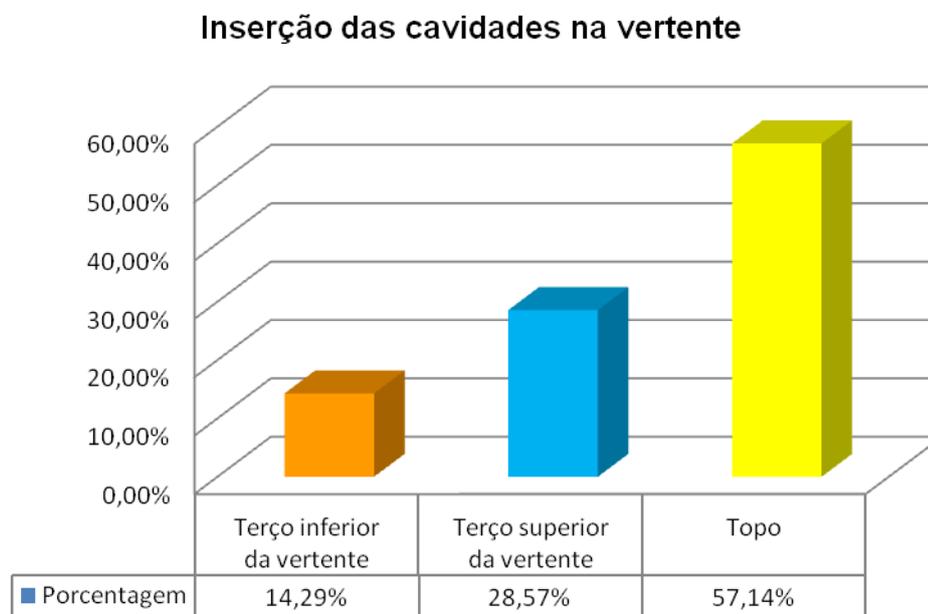


GRÁFICO 6.3 - Inserção das cavidades no vertente

QUADRO 6.1

Relação entre as cavidades e sua inserção conforme os indicadores geomorfológicos

Cavidades	GMC	GE	GS	GR	GRI	GC	GSV
Altitude (m)	975	1214	1163	1016	929	1221	1233
Declividade (%)	3 a 8	8 a 20	3 a 8	8 a 20	8 a 20	8 a 20	8 a 20
Vertente	Terço inferior da vertente	Topo	Topo	Terço inferior da vertente	Terço inferior da vertente	Topo	Topo
Relevo	Suave ondulado	Ondulado	Ondulado	Suave ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado

GMC: Gruta Monte Cristo. GE: Gruta Extração. GS: Gruta do Salitre. GR: Gruta da Ressurgência. GRI: Gruta Ribeirão do Inferno. GC: Gruta Curralinho. GSV: Gruta das Sempre Vivas

No interior das cavidades foram registradas estruturas geológicas, sendo que planos de acamamento, falhas e fraturas foram as feições mais encontradas; as dobras foram registradas em duas cavidades e o contato litológico entre as unidades basal e média da Formação Sopa-Brumadinho foi observado em uma cavidade (GRAF. 6.4). Destaca-se que algumas cavidades apresentam mais de um atributo geológico (falhas, fraturas, dobras e contato litológico) (FIG. 6.3).

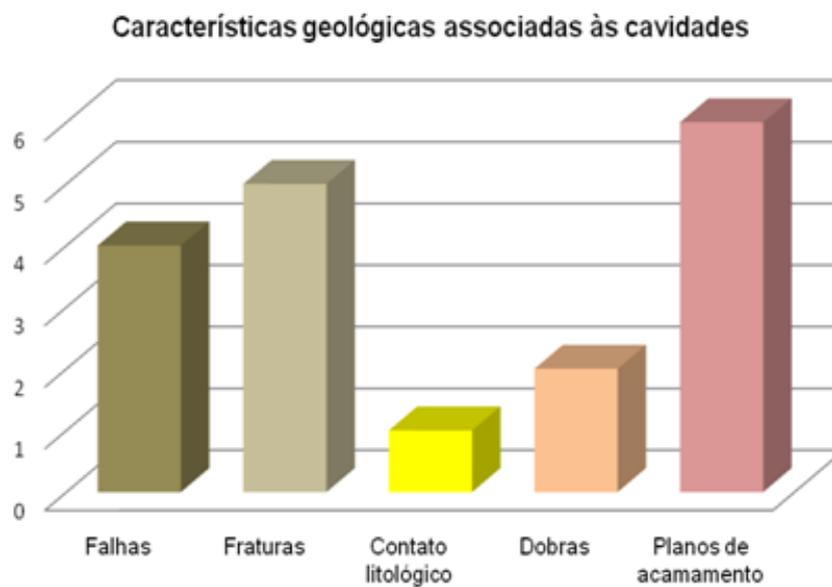


GRÁFICO 6.4 - Feições geológicas no interior das cavidades na região SE de Diamantina

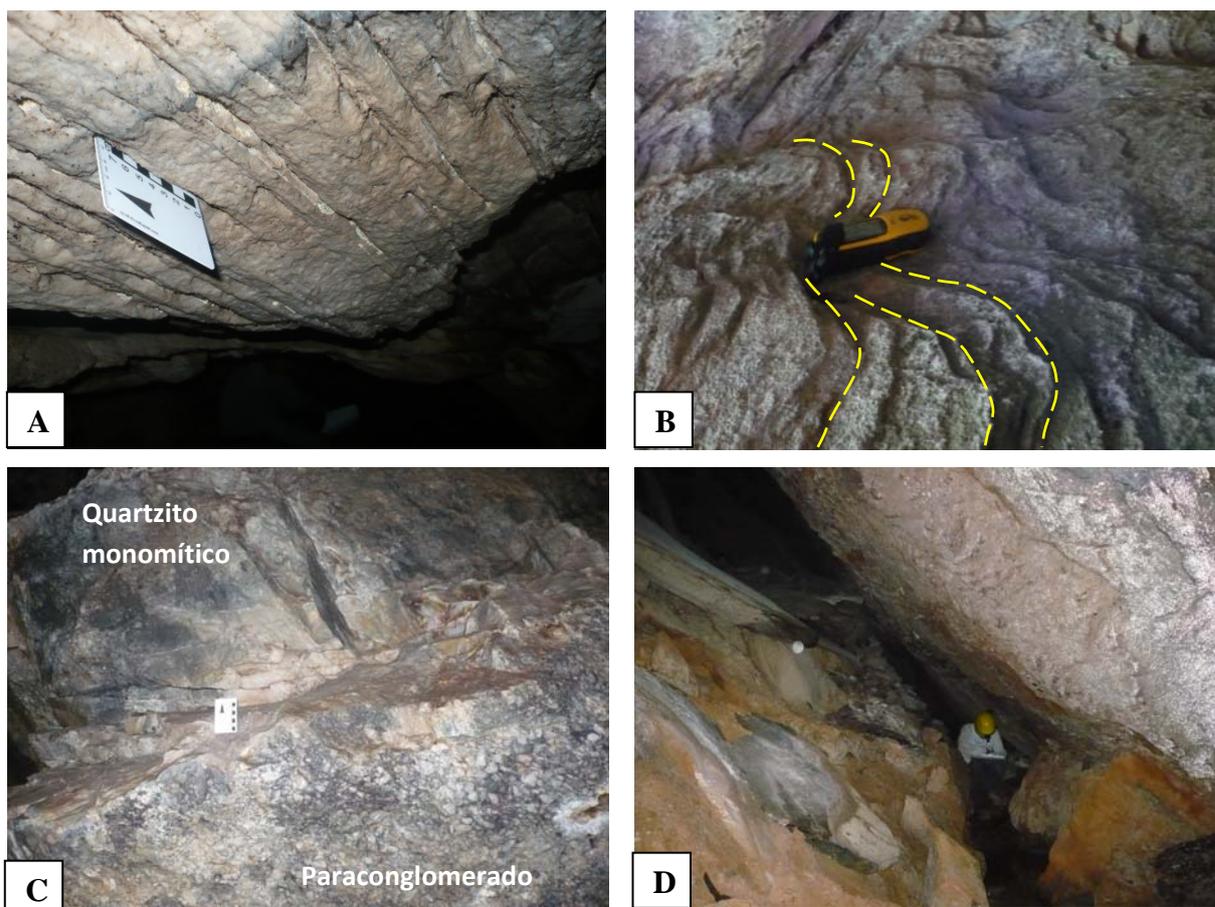


FIGURA 6.3 - Feições geológicas no interior das cavidades na região SE de Diamantina. Fraturas (A), dobras (B), contato litológico (C) e falha (D).

Fotos: Gomes, M. D. A. (A); Lopes, F. A. (B; D); Souza, F. C. R. (C)

As cavidades foram caracterizadas conforme os processos hidrológicos atuantes (FIG. 6.4). Constatase que a ocorrência de condensação (6 cavidades ou 86%), gotejamento perene (4 ou 57%) e drenagem perene no interior das cavidades (4 ou 57%) são os processos hidrológicos mais comuns na região SE de Diamantina. Processos hidrológicos intermitentes, como gotejamento (3 ou 43%) e condensação (3 ou 43%) ocorrem em algumas cavidades pesquisadas. Algumas cavidades estão associadas à ocorrência de sumidouros (1 ou 14%) e surgências ou ressurgências (1 ou 14%) (GRAF. 6.5).

A ocorrência de sumidouros e surgências ou ressurgências possui baixa densidade e está associada à resistência da rocha que reduz a ação dos processos químicos. A predominância de processos hidrológicos perenes, por sua vez, pode estar associada aos índices pluviométricos (média anual de 1.404 mm, conforme o INMET, 2010), temperatura (média anual de 18°C a 19°C) e umidade relativa do ar (máxima de 89,7%, e a mínima de 72,3%) da área pesquisada. Estes indicadores favorecem a precipitação em relação à evapotranspiração e esta característica, somada às condições ambientais inerentes ao meio subterrâneo, que é caracterizado por estabilidade térmica, favorecem a ocorrência de drenagens perenes.



GRÁFICO 6.5 - Processos hidrológicos nas cavidades na região SE de Diamantina

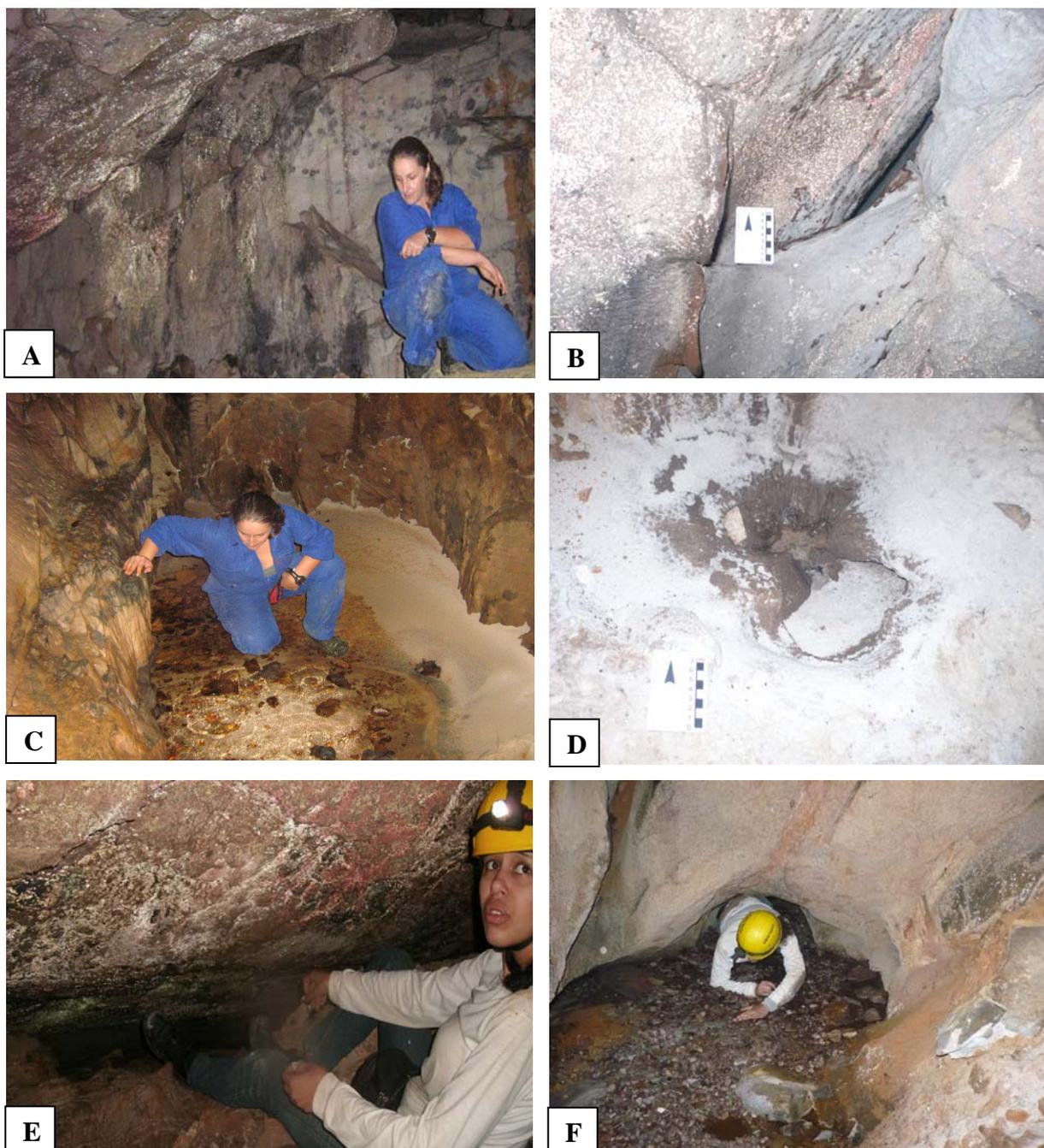


FIGURA 6.4 - Processos hidrológicos nas cavidades na região SE de Diamantina. Condensação (A; B; e); gotejamento (C; D); drenagem perene em passagem estreita (leito com seixos e água translúcida) (F).

Fotos: Souza, F. C. R. (A, B, C); Lopes, F. A. (D, F); Ferreira, D. R. (E).

As cavidades pesquisadas são predominantemente horizontais ou suavemente inclinadas. A maioria (quatro) das cavidades possui entre 5 e 50m, uma cavidade possui entre 101 e 300m e duas cavidades possuem de 301 a 600m (GRAF. 6.6).

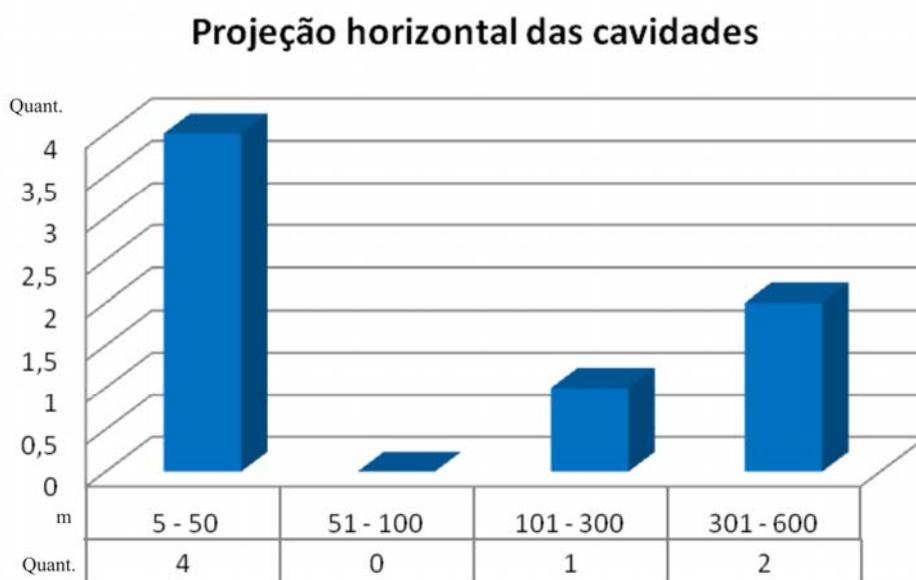


GRÁFICO 6.6 - Projeção horizontal das cavidades na região SE de Diamantina

As cavidades foram caracterizadas conforme o número de entradas, uma vez que este atributo indica a quantidade de aberturas da cavidade para o meio externo, além de serem locais de *inputs* e *outputs* de energia. Registra-se que, em termos gerais, as características mineralógicas e estratigráficas das rochas siliciclásticas favorecem a ocorrência de poucas entradas. Desta forma, o número máximo de entradas existentes nas cavidades da área pesquisada é cinco, sendo que 29% das cavidades possuem cinco entradas, 29% possui três entradas e 43% possui duas entradas (GRAF. 6.7).

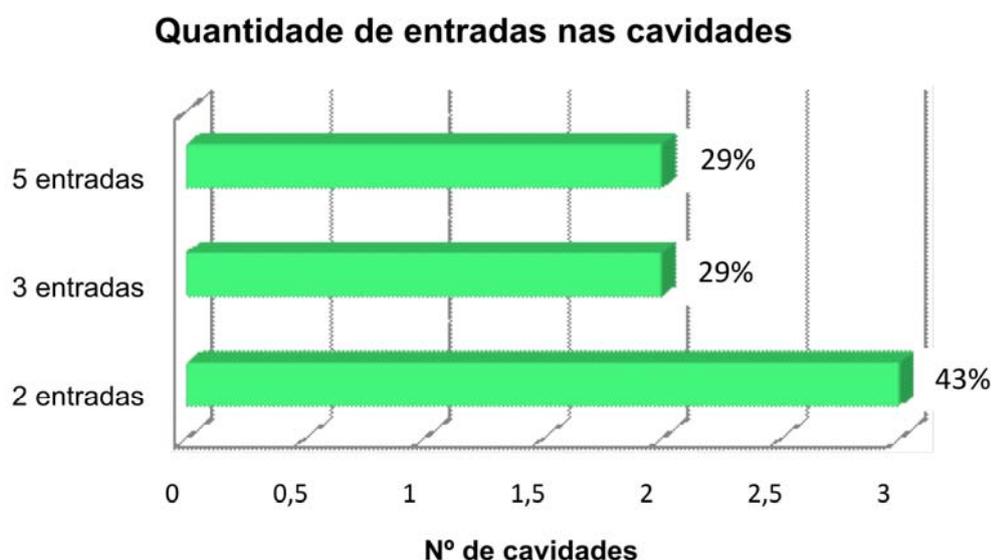


GRÁFICO 6.7 - Quantidade de entradas nas cavidades na região SE de Diamantina

As cavidades que possuem maior número de entradas estão associadas ao surgimento de clarabóias, devido à redução da espessura da rocha e abatimento do teto das cavidades, conforme observado em campo.

6.2. Caracterização Morfológica das Cavidades

6.2.1. Gruta Monte Cristo

A Gruta Monte Cristo possui apenas estudos de cunho biológico, como Braga *et al.* (2011a e 2011b), que mencionam a presença de aranhas do gênero *Trechona* (conhecidas com aranhas caranguejeiras) e Barata *et al.* (2011) registram a ocorrência de 12 espécies de flebotomíneos (conhecidos como mosquito palha, birigui, cangalha ou tatuquira). Braga *et al.* (2011a e 2011b) acrescentam que a cavidade é predominantemente horizontal, possui aproximadamente 200m de desenvolvimento linear e apresenta zonas fótica, afótica e de penumbra. Esses autores realizaram também aferições da temperatura no interior da cavidade nas zonas fótica e afótica. Devido à característica do período investigado (janeiro/2010 a junho/2011) e há pequena variação deste indicador nas zonas da cavidade. A zona fótica apresenta média de 20,8 a 22,85°C e a zona afótica possui em média 18,9 a 20,7°C.

A Gruta Monte Cristo (FIG. 6.5 e 6.6) apresenta duas entradas, sendo uma ampla em termos de altura (5m) e extensão (31m) e outra com altura de 0,5m e largura de 0,7m. A cavidade é composta por dois salões caracterizados em alguns trechos pela presença de teto e piso suavemente inclinados e outros segmentos com piso horizontalizado. Essa cavidade possui 216m de projeção horizontal, 20m de desnível, 3452,5m² de área e volume aproximado de 20715m³.

A Gruta Monte Cristo apresenta características morfológicas específicas em cada salão. O Salão Principal apresenta drenagem e gotejamento perenes e é caracterizado por dimensões de altura (média 5m) e largura (25m) maiores que o Salão Oeste. A drenagem perene neste salão surge no interior da própria cavidade, a água é translúcida, os segmentos drenados são rasos (0,2m de profundidade, no máximo) e com estreitos (aproximadamente 0,5m). A drenagem intermitente origina na parte exógena da cavidade e flui para o interior do conduto principal. Neste salão, os depósitos clásticos são compostos por silte, areia, grânulos, seixos, matacão e blocos abatidos distribuídos ao longo de todo o salão. Os principais depósitos orgânicos são guano e folhas, que estão localizadas, respectivamente, na zona afótica e na entrada da cavidade. Os depósitos químicos mais comuns são coralóides e

escorrimentos. A FIG. 6.6. registra algumas características morfológicas da Gruta Monte Cristo.

O Salão Oeste é caracterizado por apresentar dimensões morfométricas médias de 1m de altura e largura de 4m. Esse salão destaca por apresentar depósitos clásticos organizados estratigraficamente, que em alguns casos preenche o conduto do piso ao teto. Esses depósitos são compostos predominantemente por material arenoso. Os processos hidrológicos existentes são gotejamento e condensação perenes, e drenagem intermitente, que quando está ativa origina-se do interior do próprio conduto. Já os depósitos químicos não foram verificados neste local, o que pode está associado à presença de água e depósitos clásticos preenchendo todo o conduto e consequentemente impedido a formação dos depósitos químicos.



FIGURA 6.5 – Características morfológicas da Gruta Monte Cristo. A) Salão amplo com passagem triangular. B, C) Entrada da cavidade. D) Passagem de teto com morfologia irregular.

Fotos: Souza, F. C. R (A); Dimitri, M. (B, C, D)

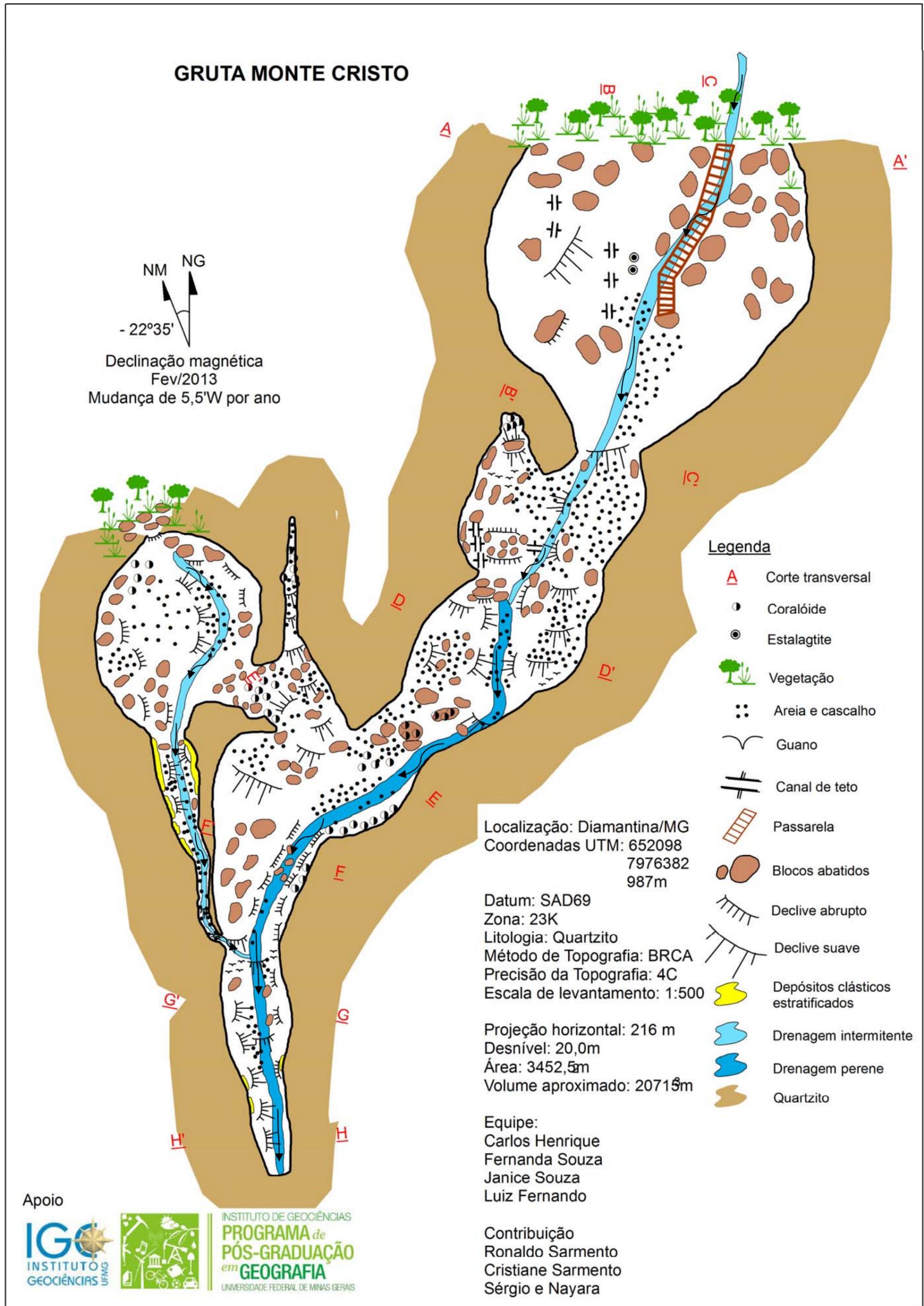


FIGURA 6.6 - Topografia da planta baixa Gruta Monte Cristo

Algumas características morfológicas da Gruta Monte Cristo indicam que, embora os processos mecânicos foram atuantes e estão registrados principalmente na entrada da cavidade por meio da quantidade de blocos abatidos; processos químicos e hidrológicos contribuíram para a formação da cavidade. Entre essas características, destaca-se a presença de canais de teto associados a fraturas e também há segmentos de condutos baixos, estreitos e com formato oval (FIG. 6.7. G, H).

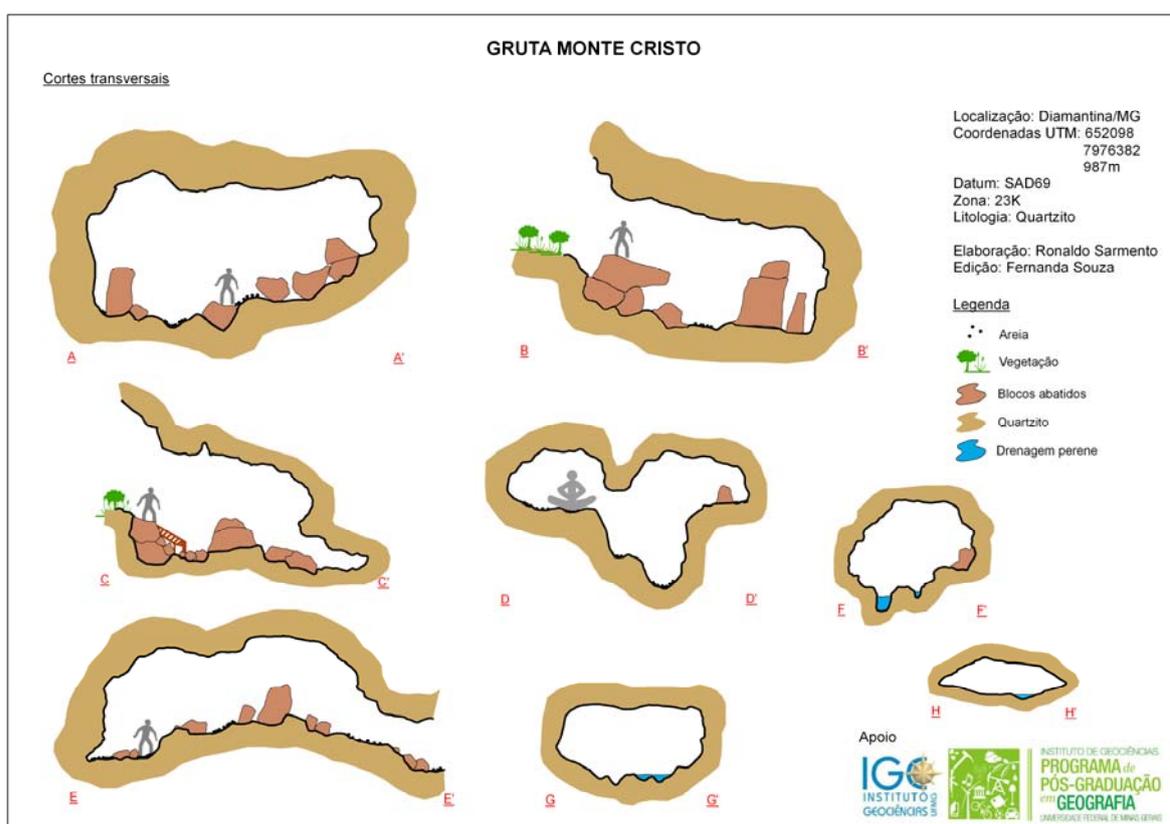


FIGURA 6.7 – Perfis de cortes transversais da Gruta Monte Cristo

6.2.2. Gruta da Ressurgência

A Gruta da Ressurgência (FIG. 6.8) localiza-se próximo à Gruta do Salitre, é composta por salão único e apresenta duas entradas: uma em clarabóia e outra horizontal. Essa cavidade apresenta teto e piso suavemente inclinados e o desenvolvimento da cavidade é concordante com o caimento da vertente. Essa cavidade é caracterizada por ser baixa (média 0,5m) e largura média de 2m.

Os processos hidrológicos atuantes são drenagem, gotejamento e condensação perenes. Destaca-se que a drenagem presente na cavidade possui origem externa, entra na

cavidade pela clarabóia, percorre toda a cavidade e emerge em forma de ressurgência. Os principais depósitos clásticos registrados são cascalhos e os depósitos químicos estão presentes na forma de coralóides. Os coralóides são feições recorrentes e as características locais favorecem a sua presença, visto que a cavidade possui 9,6m de projeção horizontal, desnível de 2,7m, área de 54,7m² e volume aproximado de 63,1m³. Essa cavidade possui duas entradas e a abertura horizontal é caracterizada por ser baixa, porém larga, o que favorece a circulação de ar na cavidade e, conseqüentemente, formação destas feições.

A presença de sulcos no piso e teto da cavidade tem relação direta com os lineamentos estruturais e podem ser registros de ação hidrológica e processos de dissolução. Essas feições no teto indicam a presença de fluxo freático que possivelmente contribuiu para a abertura da cavidade. A hipótese da formação de *bubble trail*, descrita por Palmer (2007), pode explicar a origem destes sulcos. Assim, quando a cavidade apresentava zona freática, houve acumulação de bolhas com CO₂ que tornaram a água circulante agressiva e possibilitou a origem destas feições.

6.2.3. Lapa Ribeirão do Inferno

A Lapa Ribeirão do Inferno (FIG. 6.9) localiza-se às margens da drenagem homônima, possui três condutos, apresenta morfologia, predominantemente horizontalizada, possui 25m de projeção horizontal, 1,0m de desnível, área de 70m² e volume aproximado de 84m³. Essa cavidade apresenta a ocorrência de areia, matacão e alguns blocos abatidos em seu interior. Em relação aos processos hidrológicos, há drenagem, condensação e gotejamento intermitentes. A drenagem intermitente quando ativa origina-se no interior da própria cavidade e flui diretamente para o Ribeirão do Inferno.

Os condutos são caracterizados por serem, em geral, baixos, estreitos, apertados e apresentam morfologia semicircular. As características morfológicas dos condutos, o contexto espacial de inserção da cavidade e a presença dos tipos de depósitos clásticos sugerem que os processos de dissolução e ação hídrica contribuíram para a formação das cavidades.

Além disso, a cavidade apresenta depósitos químicos como coralóides na parede e teto e também sulcos verticais, que estão presentes principalmente no teto da cavidade. A FIG. 6.10 apresenta algumas características da Lapa do Ribeirão do Inferno e Gruta da Ressurgência.

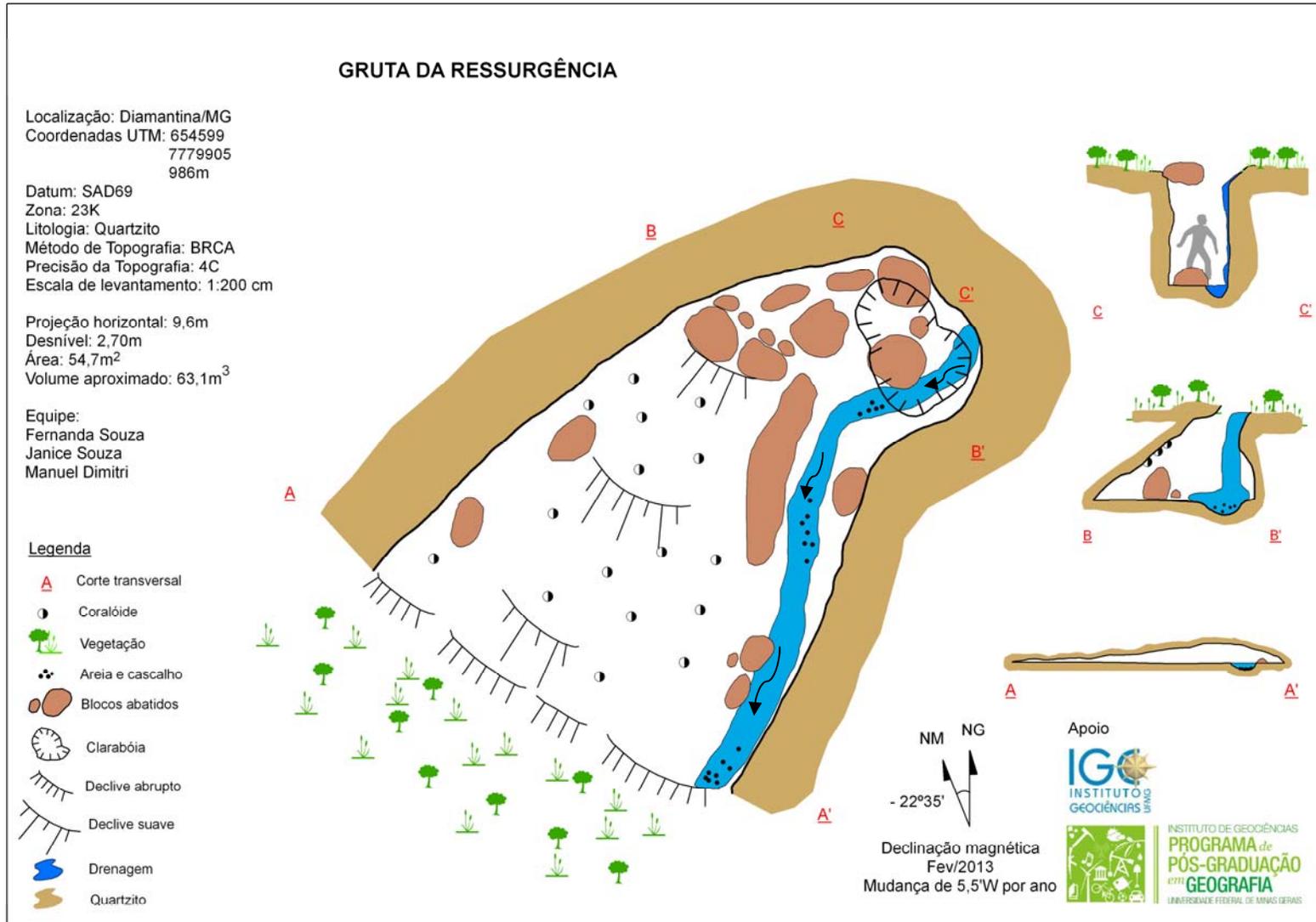


FIGURA 6.8 - Topografia da Gruta da Ressurgência

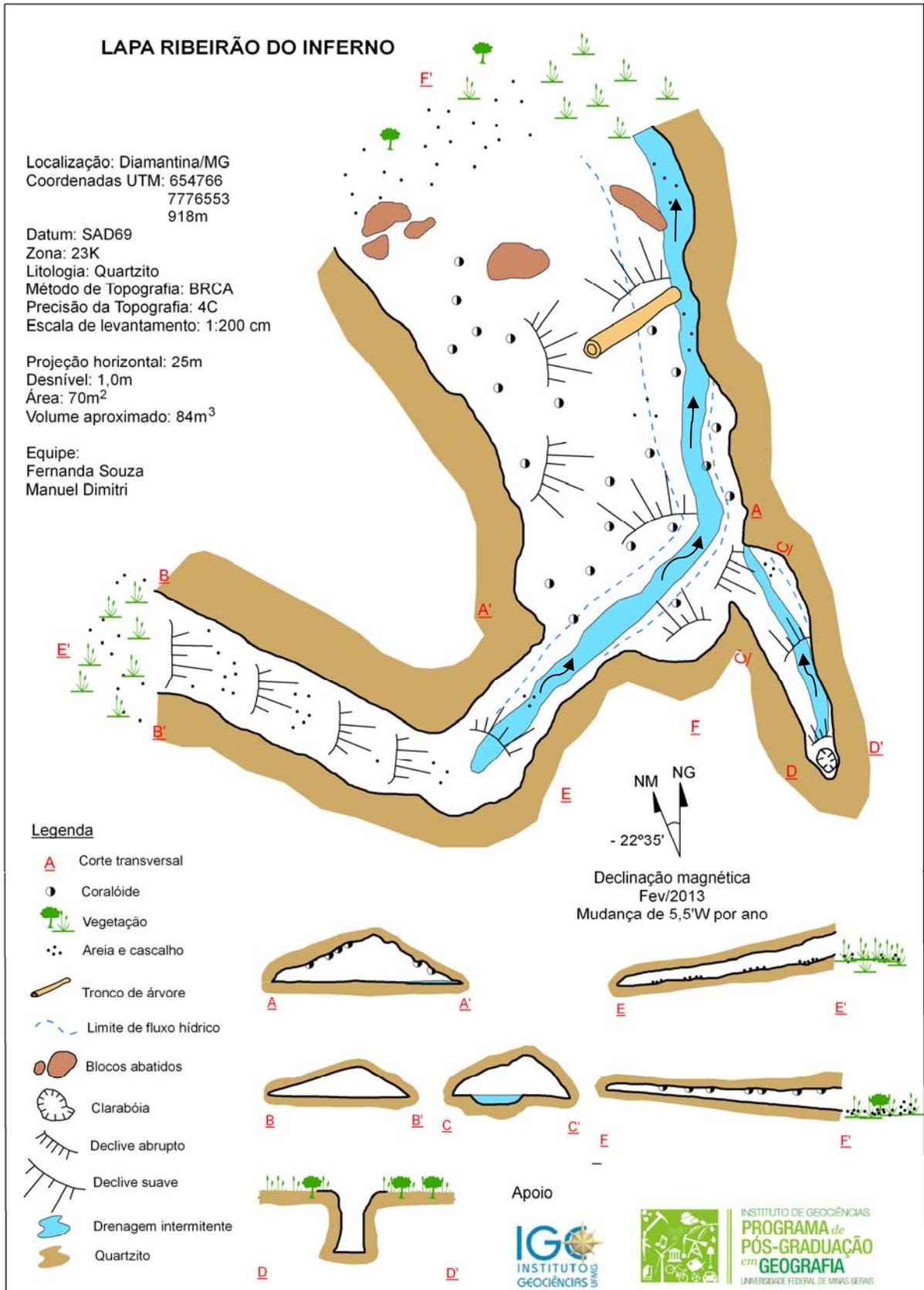


FIGURA 6.9 – Topografia da Lapa Ribeirão do Inferno

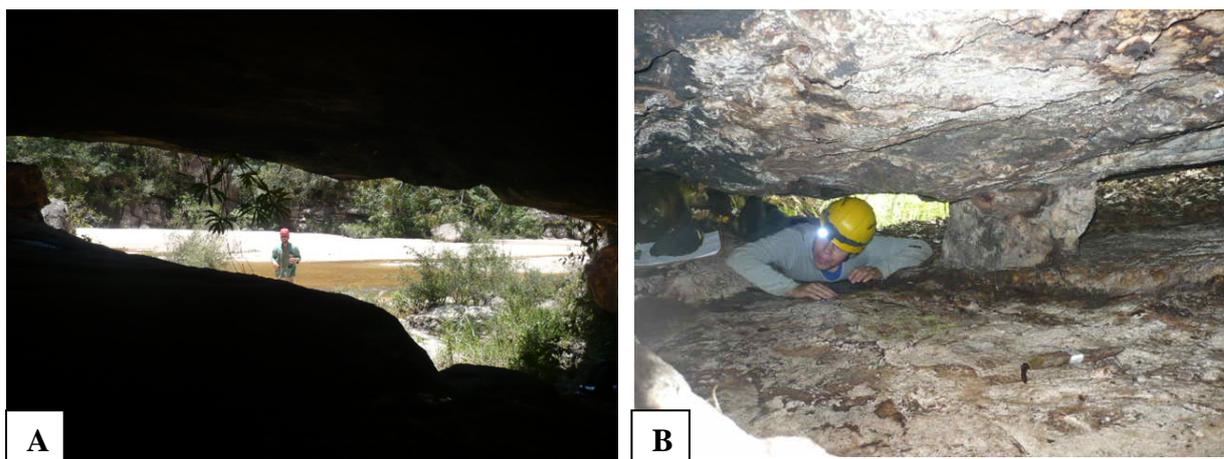


FIGURA 6.10 – Características da Lapa Ribeirão do Inferno (A) e Gruta da Ressurgência (B).
Fotos: Souza, F. C. R. (A); Dimitri, M. (B) (2013)

6.2.4. Gruta Curralinho

A Gruta Curralinho (FIG. 6.11, 6.12) possui quatro entradas, é predominantemente horizontalizada e apresenta teto e piso suavemente inclinados em alguns locais. A presença de fraturas é recorrente e principalmente no teto observa-se que alguns espeleotemas acompanham a direção dos lineamentos estruturais. A morfologia dos condutos é irregular, mas em geral há dois tipos de segmentos: a) baixos, ovalados e estreitos e b) baixos, largos e com formas irregulares.

Essa cavidade possui 40,5m de projeção horizontal, 7,0m de desnível, 267,5m² de área e volume aproximado de 481,5m³; além disso, é caracterizada hidrologicamente pela presença de drenagem, gotejamento e condensação intermitentes. Os depósitos clásticos estão organizados estratigraficamente em um conduto da cavidade e, além disso, areia, grânulos, seixos, matacões e blocos abatidos estão distribuídos em todas as áreas da cavidade. Os principais depósitos químicos são coralóides presentes no teto e parede da cavidade.

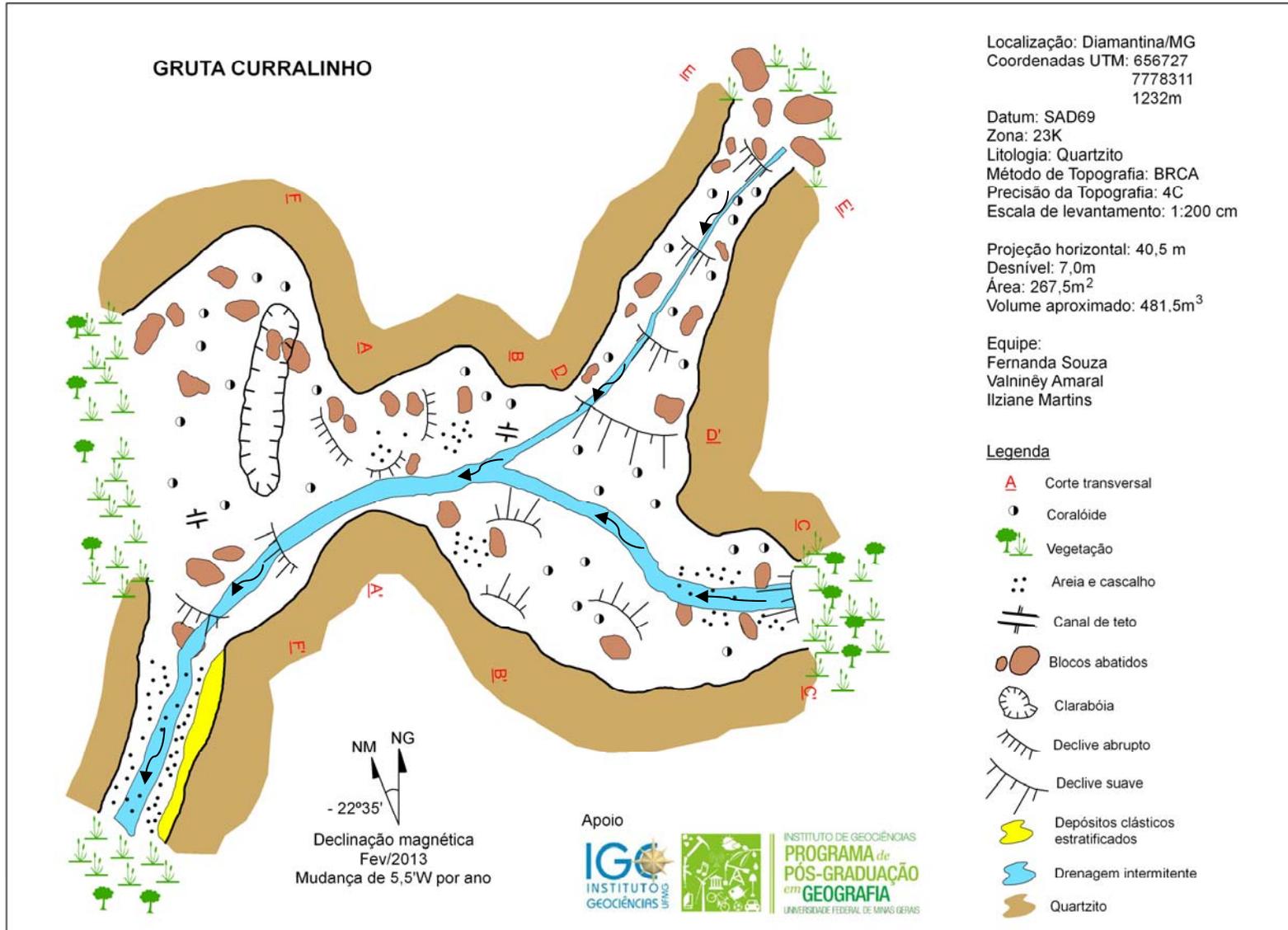


FIGURA 6.11 – Perfis de cortes transversais da Gruta Curralinho

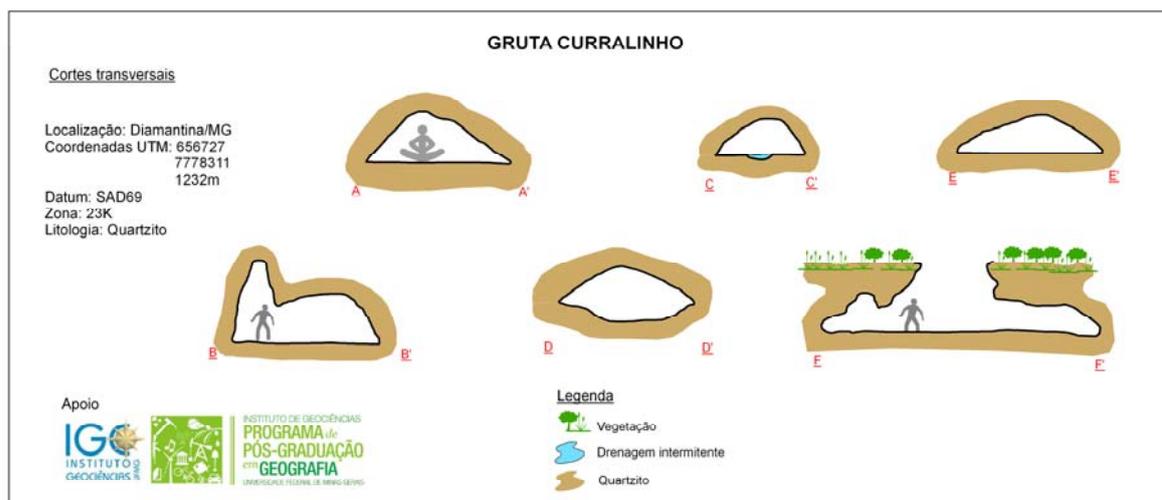


FIGURA 6.12 – Perfis de cortes transversais da Gruta Curralinho

6.2.5. Gruta Extração

A Gruta Extração (FIG. 6.13, 6.14) caracteriza-se pela presença de quatro entradas e possui 387m de projeção horizontal, 23m de desnível, área de 3.135m² e volume aproximado de 9.434m³. Essa cavidade desenvolve-se próximo à ruptura de declive, possui teto e piso suavemente inclinados e o desenvolvimento da cavidade é concordante ao caimento da vertente. Essa cavidade apresenta três níveis de desenvolvimento inferiores e um nível superior em relação ao conduto principal. Este fator pode indicar mudanças no nível de água e na velocidade hidráulica de formação da cavidade. Alguns locais atualmente há presença de água perene ou são caracterizados por mudanças abruptas no piso, o que aumenta a velocidade de escoamento e da atuação hídrica.

Em relação aos depósitos clásticos, destaca-se a presença de depósitos organizados estratigraficamente, além da presença de areia, silte, grânulos, seixos, matacão e blocos abatidos distribuídos ao longo de toda a cavidade. Os processos hidrológicos presentes na cavidade são drenagens, condensação e gotejamentos perenes e drenagem intermitente.

As características morfológicas dos condutos são variáveis, entretanto, destaca-se que o salão principal corresponde ao conduto com maiores dimensões morfométricas e isso está relacionado, principalmente, aos processos mecânicos de abatimento de blocos que são mais expressivos neste local da cavidade. Os salões de níveis inferiores da parte oeste, em geral, são baixos e inclinados, nesta parte há os espeleotemas com as maiores extensões na cavidade (25cm). Nesta porção também há passagens estreitas e baixas que fornecem acesso a salões

amplos. Na parte sudoeste, por sua vez, os condutos são estreitos, altos, quase retilíneos, marcados pela presença de drenagem e associados ao caimento da vertente.

Os depósitos químicos são compostos predominantemente por coralóides e também apresenta em menores proporções escorrimentos e couve-flor. Essa cavidade destaca-se entre as demais estudadas pela presença de depósitos químicos com maiores dimensões morfométricas.

6.2.6. Gruta do Salitre

Segundo o IBGE (1939) a Gruta do Salitre apresenta um desenvolvimento total subterrâneo de aproximadamente 150m, composto por diversas galerias e quatro salões. O maior salão em termos morfométricos apresenta largura de 65m de altura máxima de 6m.

Genser e Mehl (1977) analisa morfometricamente os segmentos associados à Gruta do Salitre e, com base em dados morfométricos da depressão a jusante do canyon, constata que o desenvolvimento deste setor está associado à dissolução. Essa afirmação associa-se a morfologia da depressão ser maior na base que no topo. Genser e Mehl (1977) mencionam que segundo informação oral de Mitt, Pflug e Walde, o desenvolvimento da Gruta do Salitre pode está associado à dissolução de produtos ligantes como feldspato, que são os componentes minerais mais solúveis que compõem os quartzitos na SdEM. Os autores acrescentam que outros fatores que associados à formação das cavidades são lixiviação, transporte mecânico das partículas de argila e os espaços porosos dos conglomerados grosseiros que facilitam o processo mecânico.

Alguns autores, como Brichta *et al.* (1980), Willems *et al.* (2005; 2008), procuraram descrever as principais características desta cavidade. Conforme Willems *et al.* (2008), a Gruta do Salitre possui drenagem e tem algumas formas características gerais como canais de teto. As formas de dissolução como domos sem fraturas são encontrados em numerosos (*sic*) lugares associados a uma impregnação de material marrom escuro nas paredes (*sic*). Análises químicas revelam que esses depósitos são feitos por criptomelano ou pirolusita (respectivamente $K(Mn^{4+}, Mn^{2+})_8O_{16}$ e MnO_2), produzidas pela lixiviação do saprolito. Essa impregnação endurece a rocha e preserva as formas de solução mais antigas (WILLEMS *et al.*, 2008).

Esta cavidade foi topografada pela Sociedade Excursionista Espeleológica (SEE, 1978) e o presente estudo amplia a área de mapeamento topográfico. Constata-se que a Gruta do Salitre (FIG. 6.13, 6.15 e 6.16) possui 593,5m de projeção horizontal, 28,0m de desnível,

8.582,25m² de área e 34.329m³ de volume. Além disso, essa cavidade apresenta em geral três entradas, apresenta desenvolvimento predominantemente horizontalizado e demonstra diferentes níveis de desenvolvimento da cavidade. Destaca-se que os condutos na porção leste apresentam desenvolvimento inativo ou condutos fósseis e os condutos na porção sudoeste registram processos ativos.

O setor leste registra depósitos clásticos na fração areia, silte, seixos, matacão e blocos abatidos distribuídos em todos os segmentos da cavidade. Destaca-se a ausência de depósitos clásticos estratificados. Registra-se a presença de depósitos orgânicos como guano em vários pontos da cavidade e sua ocorrência apresenta-se de forma pontual ou envolvendo áreas ou condutos inteiros com distâncias contínuas entre 15 e 25m de extensão e até 9m de largura. Os depósitos químicos, por sua vez, ocorrem principalmente na forma de coralóides, porém devido ao fluxo de turistas na área fótica, a entrada apresenta depredação de espeleotemas. Este setor de desenvolvimento da cavidade caracteriza-se pela ausência de processos hidrológicos perenes ou intermitentes.

No setor leste registra-se que, em termos gerais, o desenvolvimento morfológico da cavidade é caracterizado pela presença de um salão principal, relativamente retilíneo e com condutos relativamente paralelos. A entrada do salão principal possui, em média, 66m de largura e 5m de altura e caracteriza-se pela predominância quantitativa de blocos abatidos neste setor da cavidade. Com o desenvolvimento da cavidade no sentido sul, os condutos mudam o aspecto morfológico e passam a apresentar: a) morfologia baixa, larga e horizontalizada ou b) morfologia baixa, larga e suavemente inclinada. Em geral, o piso e o teto apresentam-se horizontalizados. Registra-se também a presença de paleopisos.

No setor sudoeste, os principais processos hidrológicos que ocorrem na cavidade são drenagens, condensação e gotejamentos perenes. Os principais depósitos clásticos ocorrem na fração areia, seixos, matacão e blocos abatidos e também apresenta depósitos estratificados em um conduto da cavidade. Os depósitos orgânicos são principalmente guano que ocorre de forma pontual nos condutos da cavidade.

No setor sudoeste os depósitos químicos ocorrem principalmente na forma de coralóides, crostas, escorrimentos e represas de sílica. Os condutos apresentam morfologia irregular, mas, em termos gerais, a maioria dos condutos é largos, altos e predominantemente horizontalizados. Porém destaca-se também a ocorrência de condutos estreitos, baixos e suavemente inclinados. O teto e piso apresentam-se em geral com morfologia irregular.

Para explicar a formação da Gruta do Salitre, Willems *et al.* (2008) consideram que apenas uma fase inicial e principal de processos químicos preliminares do quartzito pode

explicar a origem de grandes cavidades, como esta. Afinal, as cavidades são locais de absorção e não de ressurgência. Assim, materiais dentríticos não podem ser avacuados por erosão regressiva de uma fonte em direção a rocha maciça.

Willems *et al.* (2008) sugerem que a gênese inicial das cavidades da área de estudo ocorreu em lugares com condições anaeróbicas e em larga faixa de tempo. Quando o sistema começa a obter ar, as condições tornam-se aeróbicas e causam uma crosta ou impregnação que contribui para a formação das morfologias cársticas preliminares. Estes depósitos tornam as paredes mais resistentes que anteriormente e protegidas dos processos erosivos posteriores. Quando o fluxo de água passa a ter condições vadasas, inicia o processo de erosão mecânica, o que ocasiona o alargamento das formas mais antigas.

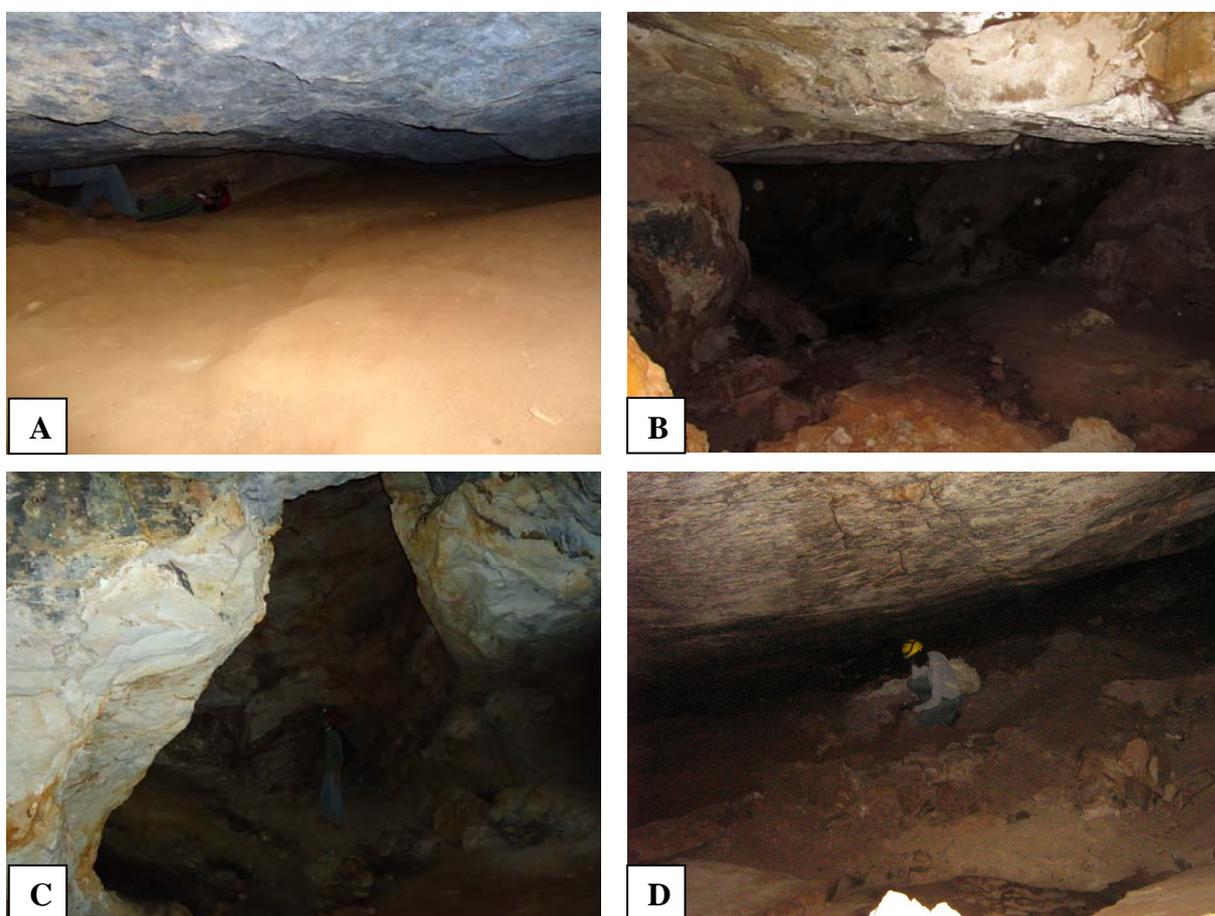


FIGURA 6.13 – Características morfológicas da Gruta do Salitre. A) Conduto baixo, largo e horizontalizado; B) Conduitos largo, alto e predominantemente horizontalizado; C) Conduto alto, largo e com morfologia triangular; D) Conduto largo, com teto suavemente inclinado e piso irregular.

Fotos: Souza, F. C. R. (A, C); Ferreira, D. R. (B, D).

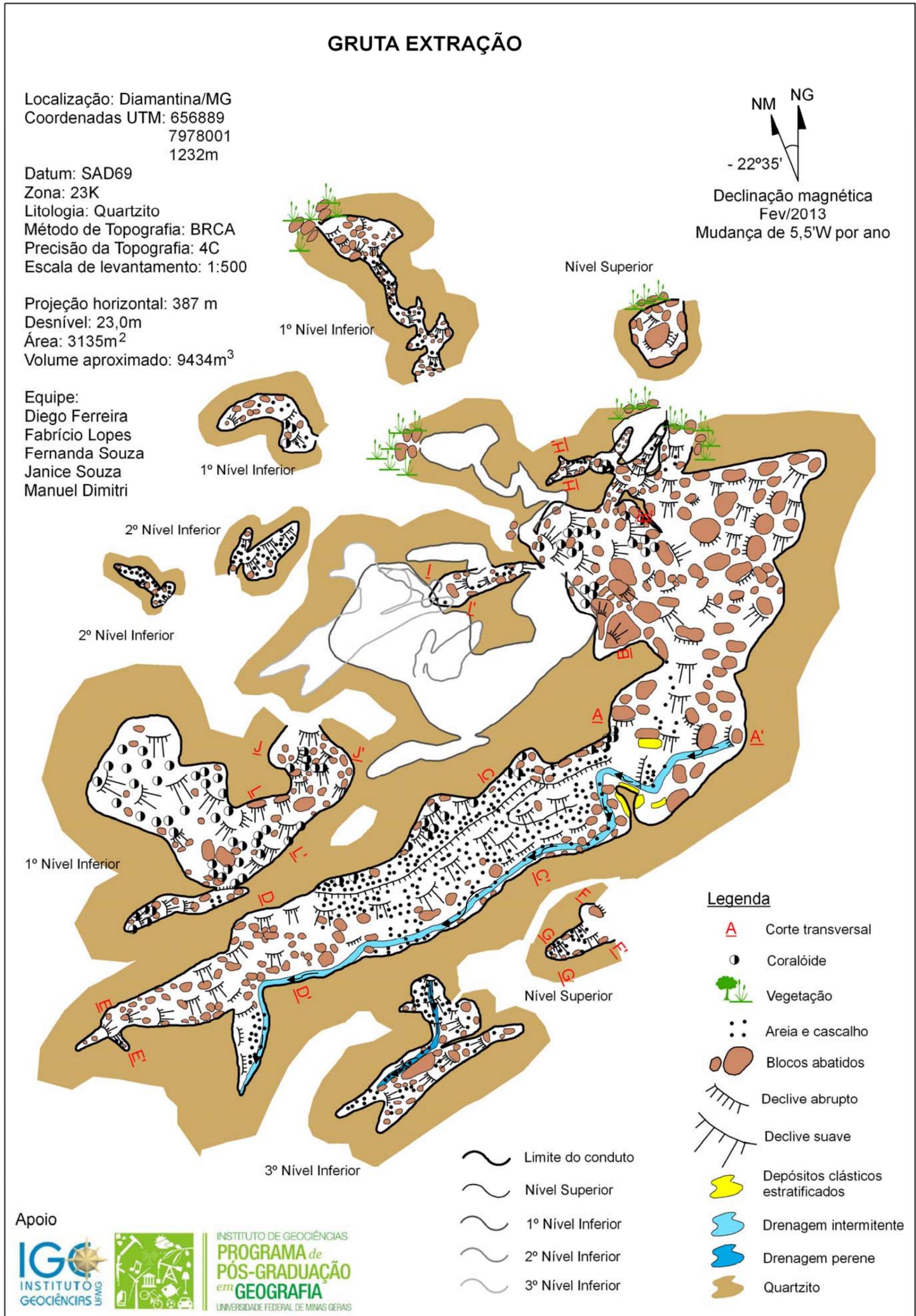


FIGURA 6.14 – Topografia da planta baixa da Gruta Extração

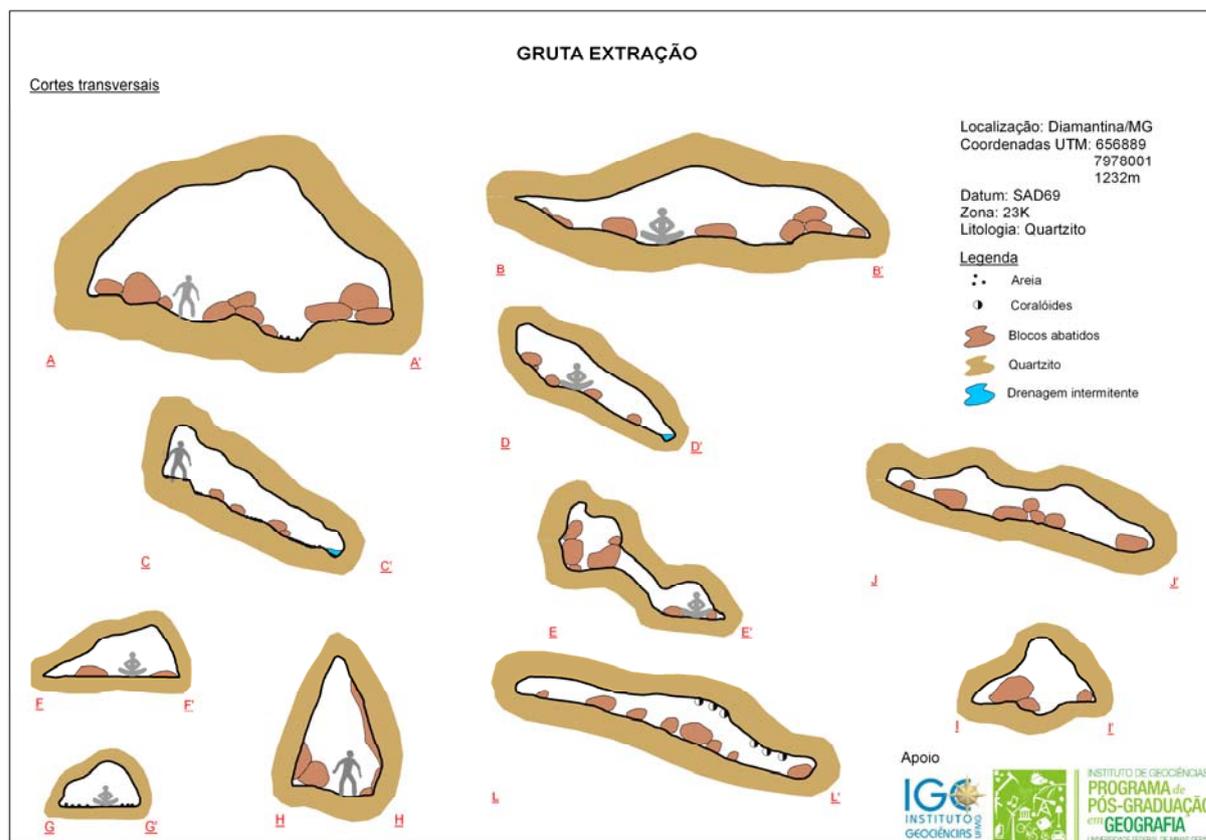


FIGURA 6.15 – Perfis de cortes transversais da Gruta Extração

6.2.7. Gruta das Sempre Vivas

A Gruta das Sempre Vivas (FIG. 6.17) possui 22m de projeção horizontal, desnível de 5m, 180,4m² de área e volume aproximado de 216,5m³. Essa cavidade localiza-se em área de ruptura de declive, é caracterizada por teto e piso inclinados e seu desenvolvimento acompanha o caimento da vertente. Em relação aos processos hidrológicos, destaca-se a ocorrência de drenagens, condensação e gotejamentos intermitentes. Os corralóides e escorrimentos são os tipos de deposições químicas mais comuns na Gruta das Sempre Vivas.

Destaca-se que depósitos clásticos ocorrem principalmente na forma de silte, areia, grânulos, seixos e matacão distribuídos de forma dispersa nos condutos da cavidade. Essa cavidade é caracterizada por apresentar condutos morfologicamente largos, baixos e suavemente inclinados.

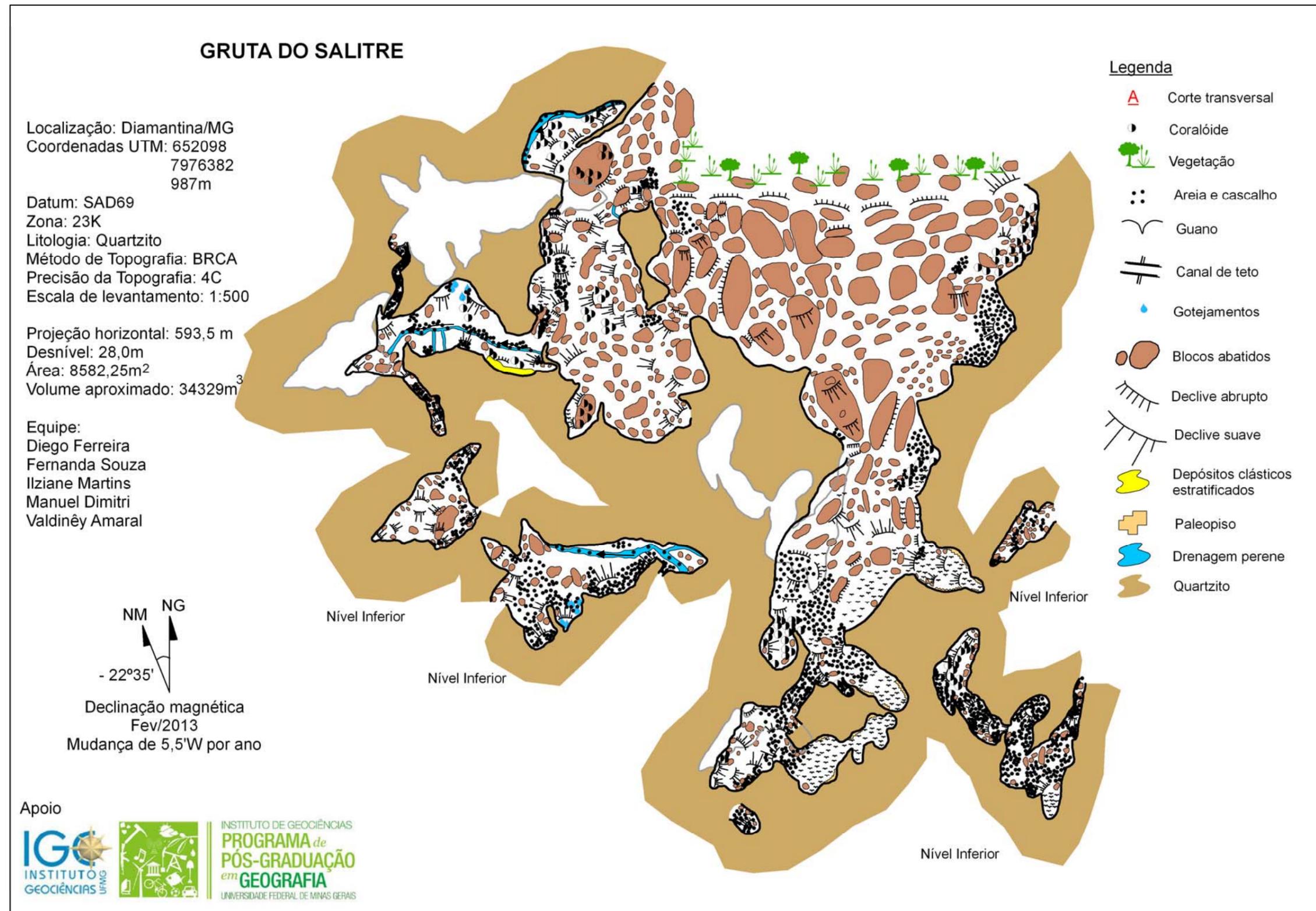


FIGURA 6.16 – Topografia da planta baixa da Gruta do Salitre

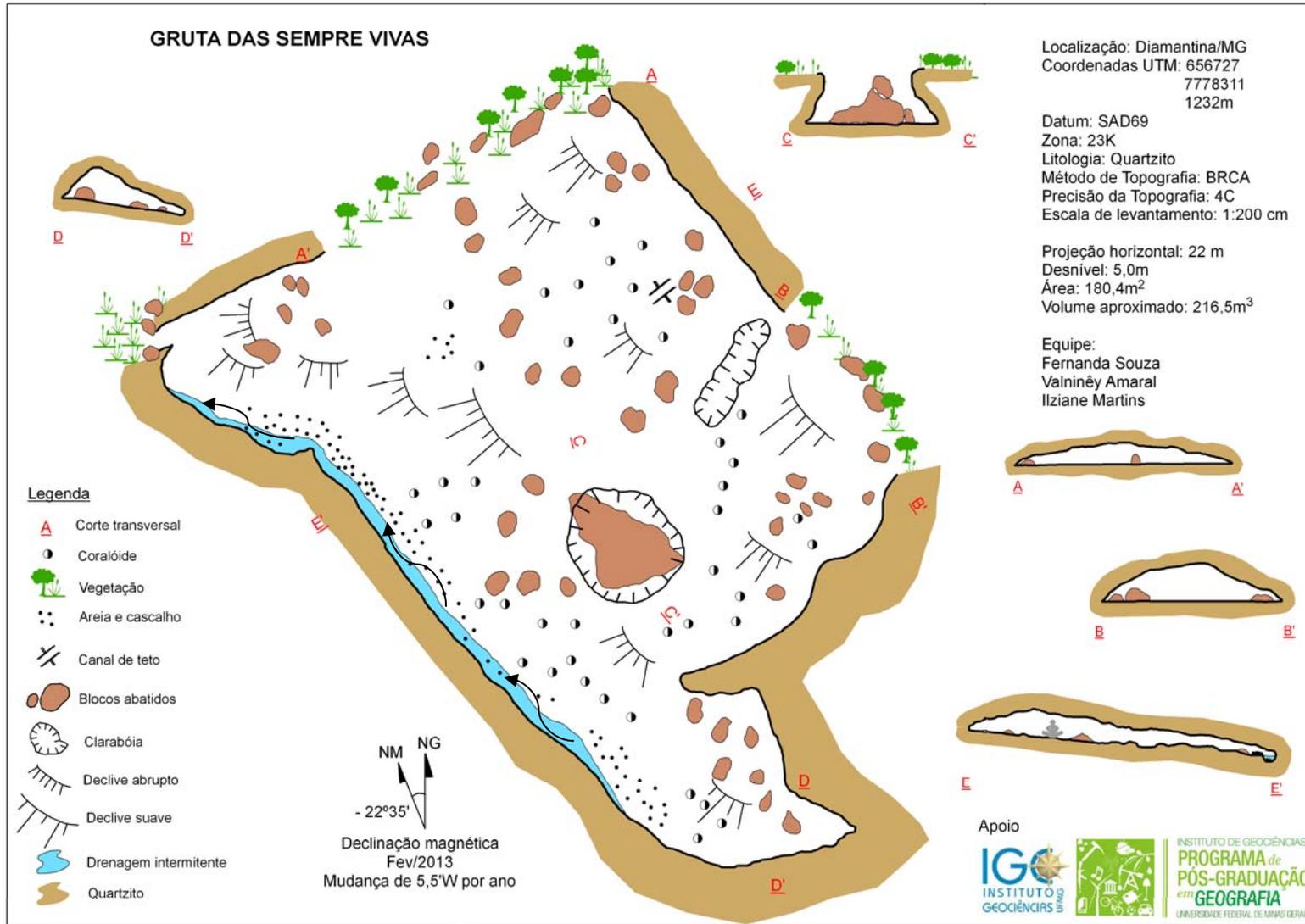


FIGURA 6.17 – Topografia da Gruta das Sempre Vivas

6.3. Discussões

O QUADRO 6.2 sintetiza as principais características morfométricas das cavidades estudadas na região SE de Diamantina. Destaca-se que em termos gerais, a maioria das cavidades da área estudo apresenta morfologia de teto e piso suavemente inclinados e são predominantemente concordantes à direção de caimento da vertente. Corrêa Neto *et al.* (1997) e Fabri (2011) ressaltam, respectivamente, que a Gruta da Bromélia, na região do Ibitipoca e as cavidades da região de Itambé do Mato Dentro também apresentam condutos que seguem paralelos à direção da topografia externa.

QUADRO 6.2

Características Morfométricas Gerais das Cavidades da Região Sudeste de Diamantina/MG

Cavidade	Proj. Horizontal (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Morfologia Geral	
				Teto	Piso
Gruta da Ressurgência	9,6	54,7	63,1	Suavemente inclinado	
Lapa Ribeirão do Inferno	25	70	84	Suavemente inclinado	
Gruta das Sempre Vivas	22	180,4	216,5	Suavemente inclinado	
Gruta Curralinho	40,5	267,5	481,5	Irregular	Horizontalizado
Gruta Monte Cristo	216	3452,5	20715	Suavemente inclinado	Irregular
Gruta Extração	387	3135	9434	Suavemente inclinado	
Gruta do Salitre	593,5	8582,25	34329	Irregular	

Em termos gerais as cavidades estudadas apresentam galerias e salões com morfologias retangulares, triangulares e elípticas horizontais. Essas características são concordantes ao observado por Corrêa Neto *et al.* (1997) nas cavidades da Serra do Ibitipoca. Silva (2004) acrescenta que além das morfologias apresentadas por Corrêa Neto *et al.* (1997) também pode-se observar o padrão oval e composto.

Na região SE de Diamantina, destaca-se que, em geral, os salões de morfologia retangular são amplos e apresentam as maiores proporções de blocos abatidos na cavidade. Entretanto, também é possível identificar salões baixos, estreitos e cujo material residual é predominantemente areia.

Ressalta-se que os padrões planimétricos das cavidades da área de estudo não se encaixam na classificação de Palmer (2007). Esse aspecto foi identificado por outros autores que investigaram cavidades em quartzito (FABRI, 2011). Com isso, percebe-se a importância de debater e estabelecer a classificação específica de padrão planimétrico para as cavidades

em rochas siliciclásticas. Afinal, conforme Martini (1984), os mecanismos envolvidos na formação destes tipos de cavidades são específicos, envolvendo dissolução e *piping*.

As características da projeção horizontal das cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas no Brasil associadas às cavidades identificadas na área de estudo pode ser observadas no GRAF. 6.8. Nota-se que a maioria as cavidades em rochas siliciclásticas no Brasil possuem entre 5 e 100m de projeção horizontal. Essa tendência morfométrica também é observada para o maior percentual das cavidades da região SE de Diamantina (GRAF. 6.8). Esses dados permitem constatar que as cavidades da área de estudo seguem a tendência geral de desenvolvimento das cavidades em rochas siliciclásticas topografadas no Brasil.

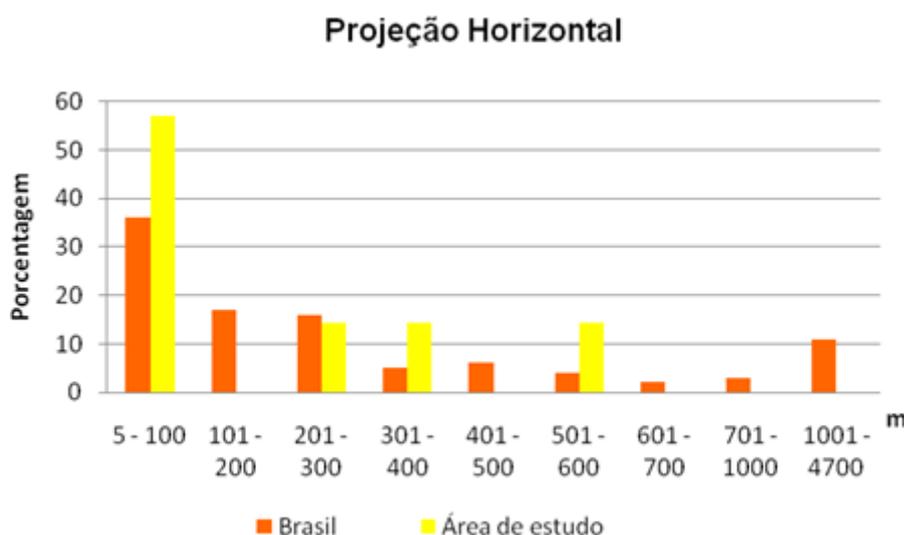


GRÁFICO 6.8 - Projeção Horizontal das cavidades em rochas siliciclásticas no Brasil e na região SE de Diamantina/MG

Fonte: Dados compilados de vários autores

Constata-se que, embora em menor concentração (11%), as cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas no Brasil podem atingir entre 1001 e 4700 metros de projeção horizontal. Em termos gerais, essas cavidades correspondem às que apresentam os maiores valores de desnível, conforme verificado durante levantamento dos dados.

Registra-se que apesar da quantidade de cavidades identificadas em quartzito representar em média 1% do potencial existente para este tipo de rocha (AULER; PILÓ, 2011a), o número de cavidades topografadas e publicadas é ainda menor. A quantidade de cavidades topografadas representa, em média, 2,5% das cavidades identificadas em rochas siliciclásticas no Brasil⁴².

⁴² Este cálculo foi feito a partir da divisão entre o número de cavidades identificadas no país, segundo levantamento de Auler e Piló (2011a) e o número de cavidades registradas durante o levantamento morfométrico

7. DEPÓSITOS QUÍMICOS E CLÁSTICOS NAS CAVIDADES DA REGIÃO SE DE DIAMANTINA

7.1. Deposição Clástica Estratificada

Os depósitos de sedimentação clástica estratificada estão presentes em 57% das cavidades e ausentes em 43% das cavidades da região SE de Diamantina (GRAF. 7.1). Esses depósitos podem ser encontrados na Gruta Curralinho, Gruta Monte Cristo, Gruta do Salitre e Gruta Extração e possuem características específicas em cada cavidade. A FIG. 7.1 mostra os cortes transversais das cavidades no ponto representativo dos depósitos.

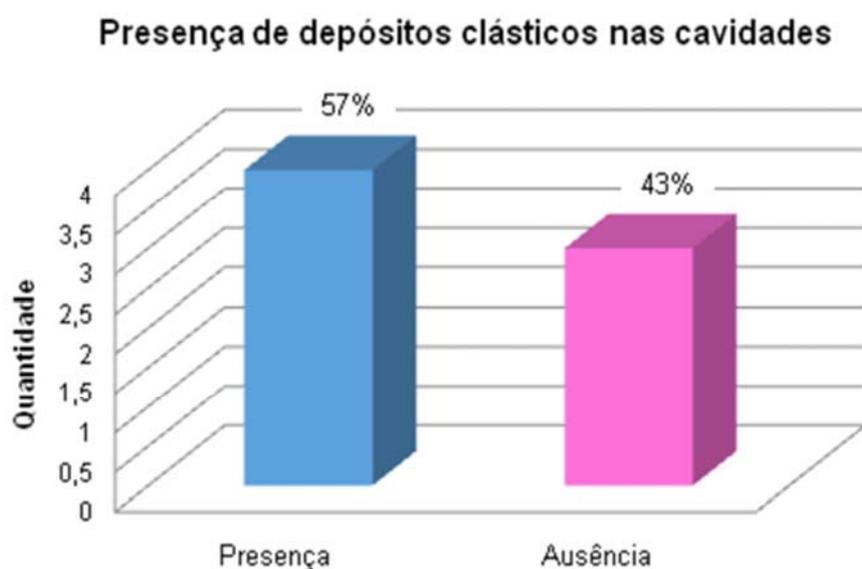


GRÁFICO 7.1 - Presença de depósitos clásticos nas cavidades na região SE de Diamantina



FIGURA 7.1 - Cortes de depósitos clásticos nas cavidades na região SE de Diamantina

que apresentavam dados de projeção horizontal ou desenvolvimento linear, cujo dado preciso requer realização de topografia.

Os depósitos sedimentares na Gruta Curralinho possuem aproximadamente cinco metros de extensão, 80cm de espessura, deposição plano paralela, sua distribuição espacial encontra-se concentrada em um salão e compreende o perímetro do piso ao teto deste conduto. As condições ambientais preservaram cinco fácies de deposição plano paralelas, compostas predominantemente por areia fina branca (5YR 8/1, úmida) e branca (5YR 8/1, seca) (FIG. 5.17A e B), alternadas com fácies com ocorrência de seixos finos de quartzo em matriz arenosa branca (2,5YR 8/1, úmida) e transição clara entre as fácies⁴³. Não apresenta registros de matéria orgânica e raízes. Na parede externa do depósito sedimentar há fungos de coloração, predominantemente, verde (FIG. 7.2C).

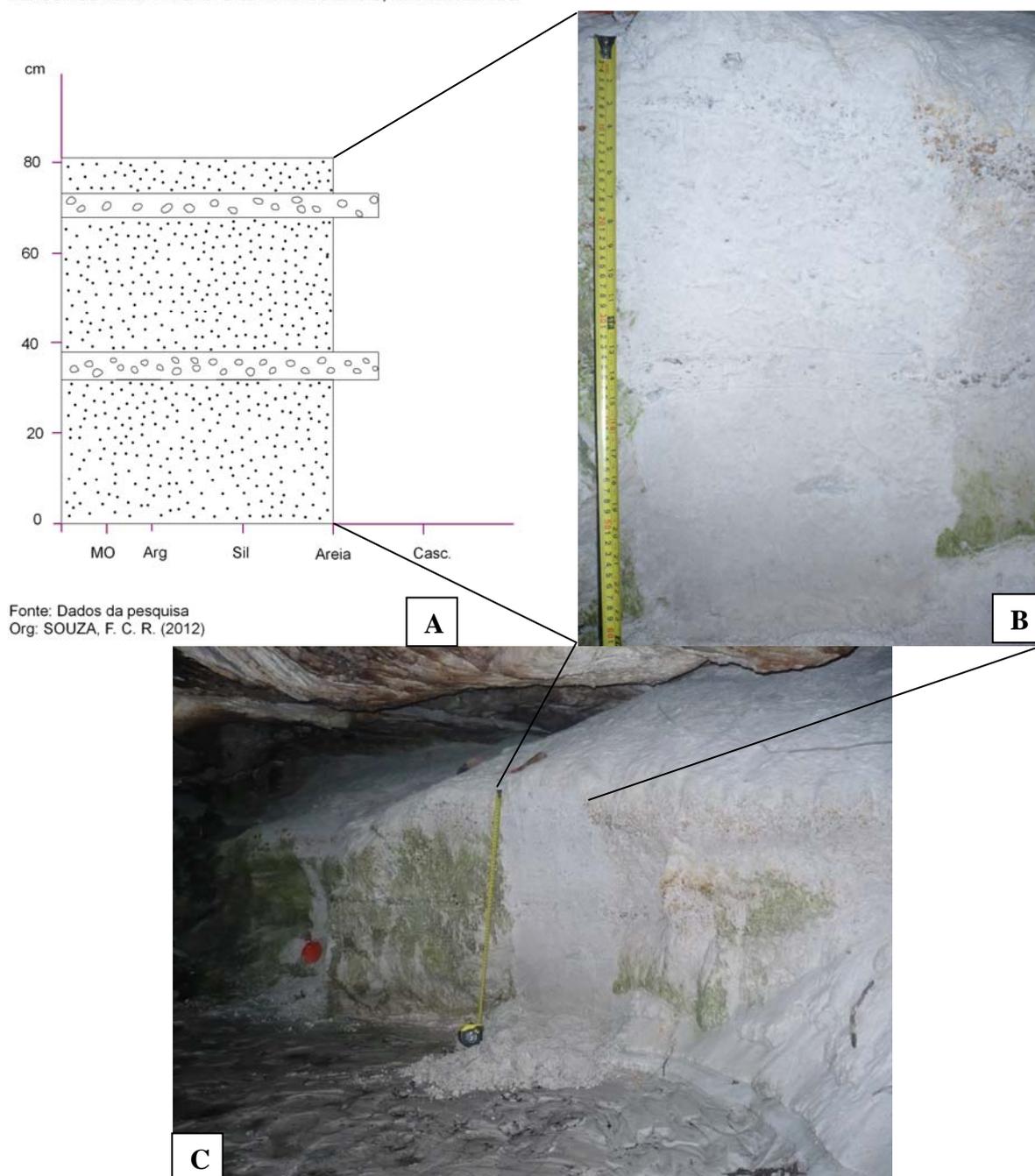
Na Gruta do Salitre estão preservados depósitos clásticos situados aproximadamente a 4m de altura em relação ao curso hídrico atual. Os depósitos possuem em média 12m de extensão, 100cm de espessura, apresenta registros de deposição plano paralela e sua distribuição espacial encontra-se concentrada em um salão da cavidade. Estão expostas cinco fácies de deposição, compostas principalmente por areia fina vermelho amarelado (5YR 5/8, úmida) e amarelo avermelhado (5YR 6/8, seca) alternados com fácies de matriz areia média de cor vermelho (2,5YR 5/8, úmida) e vermelho (2,5YR 5/6, seca), marcada pela ocorrência de seixos de quartzo e petroplintita (FIG. 7.3A, B, D).

A presença das petroplintitas em fácies alternadas sugere que o processo de oxidação e redução que ocasionou a sua formação pode ter ocorrido após o sistema deposicional. Esta afirmação não implica que o material de origem seja alóctone, entretanto a organização estratigráfica destes materiais evidencia que após a deposição heterogênea de sedimentos alóctones e autóctones, ocorreram processos de oxiredução que condicionaram a formação das petroplintitas. Caso contrário, as petroplintitas estariam depositadas de forma desordenada e não em camadas, levando-se em consideração as condições inerentes aos ambientes confinados das cavidades.

Destaca-se que em alguns pontos os depósitos clásticos estão cobertos por crostas de deposição química, que contribui para a preservação das características deposicionais (FIG. 7.3C). Não foi identificada a presença de matéria orgânica, raízes nem materiais arqueológicos.

⁴³ As cores utilizadas em todos os perfis são representações simbólicas das cores úmidas.

DEPÓSITOS CLÁSTICOS NA GRUTA CURRALINHO, DIAMANTINA/MG

**Descrição morfológica**

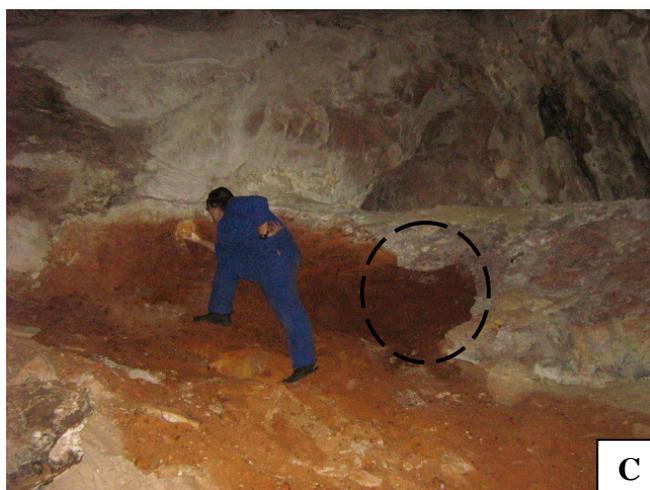
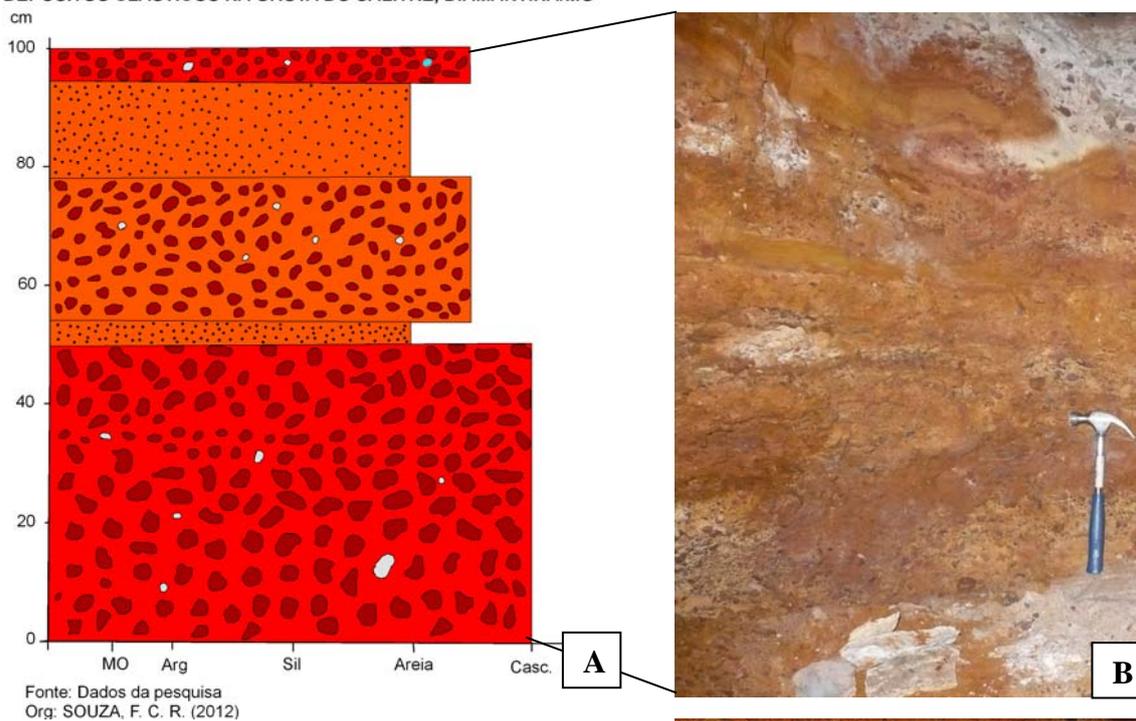
areia fina, branca (5YR 8/1, úmida) e branca (5YR 8/1, seca), grão simples, transição clara.



matriz areia fina com seixos de quartzo, branca (2,5YR 8/1, úmida) e branca (5YR 8/1, seca), matriz grão simples, transição clara.

FIGURA 7.2 - Depósitos clásticos na Gruta Curralinho. Perfil estratigráfico representado graficamente (A); depósito clástico *in situ* (B) e vista panorâmica do depósito clástico (C).
Fotos: Souza, F. C. R.

DEPÓSITOS CLÁSTICOS NA GRUTA DO SALITRE, DIAMANTINA/MG

**Descrição morfológica**

matriz areia média com seixos de quartzo e petroplintita, vermelho (2,5YR 5/8, úmida) e vermelho (2,5YR 5/6, seca), matriz fraca pequena granular, transição clara.



areia fina, vermelho amarelado (5YR 5/8, úmida) e amarelo avermelhado (5YR 6/8, seca), grão simples, transição difusa ou clara.



matriz areia média com seixos de quartzo e petroplintita, vermelho amarelado (5YR 5/6, úmida) e amarelo avermelhado (5YR 7/8, seca), matriz fraca pequena granular, transição clara.

FIGURA 7.3 - Depósitos clásticos na Gruta do Salitre. Perfil estratigráfico representado graficamente (A); depósito clástico *in situ* (B e D) e crosta de precipitação química acima do depósito clástico (C).

Fotos: Souza, F. C. R.

Os depósitos clásticos da Gruta Monte Cristo possuem aproximadamente 15 metros de extensão, 100cm de depósitos expostos (embora em alguns pontos, em média, 40cm de depósito sedimentar esteja submerso⁴⁴). As condições ambientais locais favoreceram a preservação de 38 fácies, organizadas sob o sistema de deposição plano paralela e a localização espacial dos depósitos sedimentares é concentrada e situa-se em um salão. Neste salão, o depósito ocupa o espaço que compreende do piso ao teto do conduto e a drenagem atual escava a parte central das camadas sedimentares, preservando os registros do processo de sedimentação em ambas as laterais do conduto.

As deposições clásticas na Gruta Monte Cristo são compostas basicamente por alternâncias de fácies de areia fina cinzento brunado claro (10YR 6/2, úmida) e arenosiltosas preto (10YR 2/1, úmida), predominantemente com 2cm de espessura (FIG. 7.4A). No topo do depósito há ocorrências de fácies de areia fina bruno escuro (10YR 3/3, úmida) e areia fina bruno (7,5YR 5/4, úmida); além disso, registra-se a ocorrência de raízes finas e poucas em algumas camadas sedimentares (FIG. 7.4A).

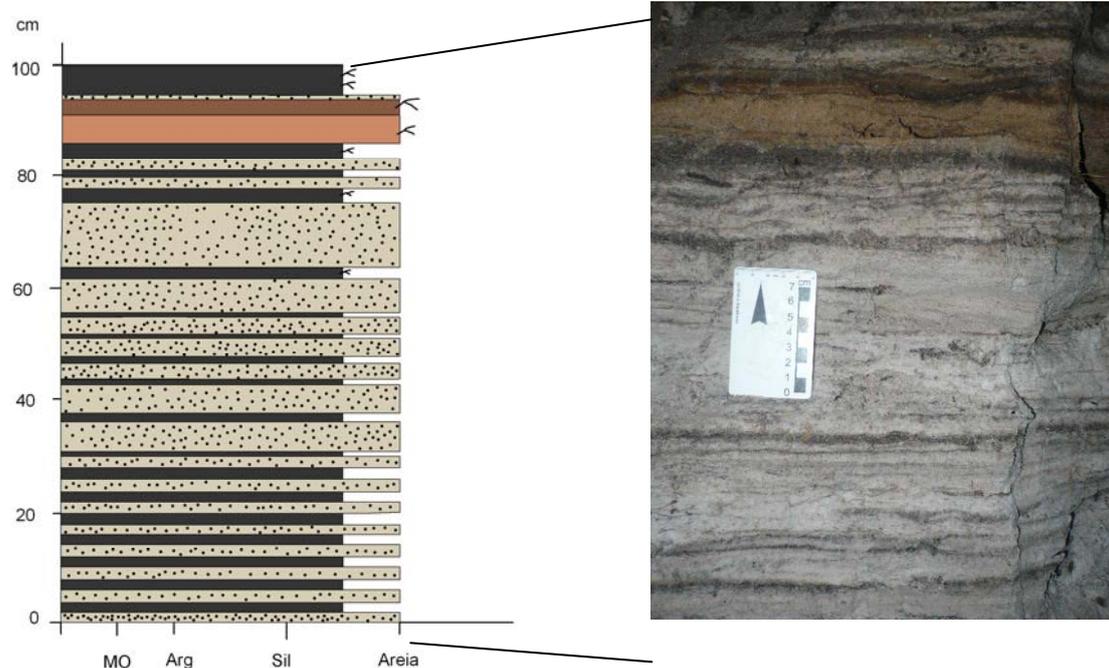
Na Gruta Extração foram identificadas 30 fácies sedimentares nos depósitos clásticos, que possui em média 12m de extensão, 208cm de espessura. As camadas possuem estruturas plano paralelas e em alguns locais encontra-se fragmentado devido à ação antrópica histórica, associada à mineração de diamante.

O depósito é composto predominantemente por duas características:

- 1) da base para o topo, nos primeiros 150cm, há alternâncias de fácies com matriz vermelho (2,5YR 5/8, úmida) e vermelho (2,5YR 5/6, seca), matriz composta por areia média com seixos de quartzo e petroplintita, matriz fraca pequena granular, transição clara e fácies com areia fina, vermelho amarelado (5YR 5/8, úmida) e amarelo avermelhado (5YR 6/8, seca), grão simples, transição clara;
- 2) a partir dos primeiros 150cm, ocorrem alternâncias de fácies argilosas, bruno escuro (10YR 3/3, úmida) e bruno claro acinzentado (10YR 6/3, seca), fraca pequena granular, transição clara e fácies de areia fina, grão simples, transição clara, nas cores vermelho amarelado (5YR 5/8, úmida) e amarelo avermelhado (5YR 6/8, seca), branco (5YR 8/1, úmida) e branco (5YR 8/1, seca) ou brunado claro (10YR 6/2, úmida) e branco (5Y 8/1, seca) (FIG. 7.5).

⁴⁴ A escavação não foi realizada porque deve ser executada por profissional especializado, conforme previsto na Portaria do Instituto do Patrimônio Artístico e Nacional (IPHAN) nº07 de 01 de dezembro de 1988 e não foi autorizada pelo Sisbio (nº36472-1).

DEPÓSITOS CLÁSTICOS NA GRUTA MONTE CRISTO, DIAMANTINA/MG



Fonte: Dados da pesquisa
Org: SOUZA, F. C. R. (2012)

A

B



C

Descrição morfológica

areia fina, cinzento brunado claro (10YR 6/2, úmida) e branco (5Y 8/1, seca), grão simples, transição clara.



areia fina, bruno (7,5YR 5/4, úmida) e cinza claro (2,5Y 7/1, seca), fraca pequena granular, transição clara, raízes finas e poucas.



areia fina, bruno escuro (10YR 3/3, úmida) e bruno claro acinzentado (10YR 6/3, seca), fraca pequena granular, transição clara, raízes finas e poucas.

arenosiltoso, preto (10YR 2/1, úmida) e bruno muito escuro (10Y 2/2, seca), grão simples, transição clara, raízes finas e poucas.

FIGURA 7.4 - Depósitos clásticos na Gruta Monte Cristo. Perfil estratigráfico representado graficamente (A); depósito clástico *in situ* (B e C).
Fotos: Gomes, M. D. A. (B); Vasconcelos, A. (D).

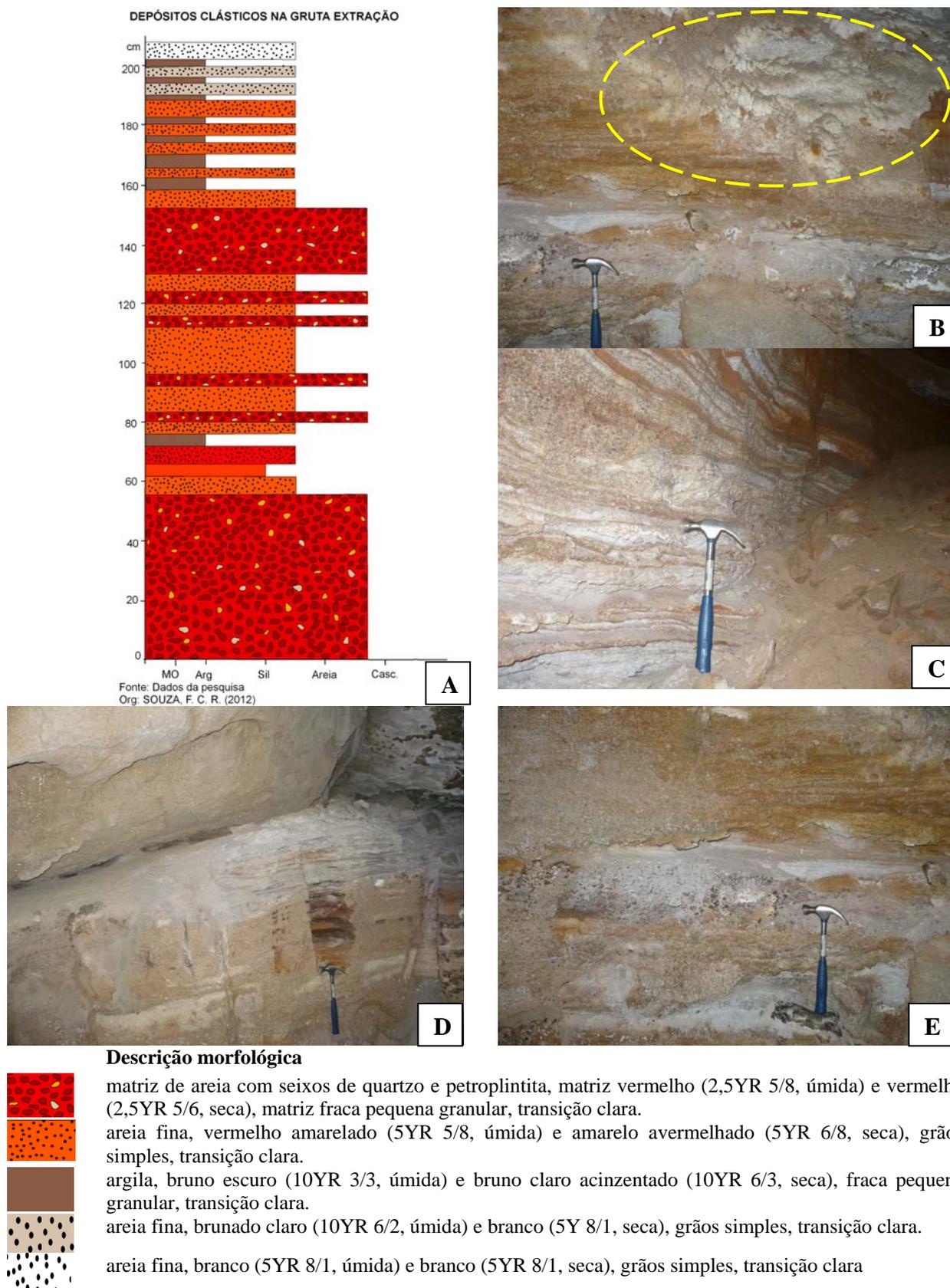


FIGURA 7.5 - Depósitos clásticos na Gruta Extração. Perfil estratigráfico representado graficamente (A); crosta de precipitação química acima do depósito clástico (B) e depósito clástico *in situ* (C, D, E).

Fotos: Souza, F. C. R.

As características sedimentares dos depósitos clásticos da Gruta Extração demonstram que os processos de oxiredução, atingiram o nível de até 188cm de altura, mas foram mais representativos até 150cm, condicionando a formação de petroplintitas. Registra-se a ocorrência de crostas de deposição química acima dos depósitos clásticos em alguns locais pontuais (FIG. 7.5B). Porém os processos de intemperismo ocorrem ao longo de todo o depósito e dificulta a visualização das fácies e suas respectivas características (cor e textura).

7.2. Deposição Química

Constatou-se que todas as cavidades analisadas apresentam deposições químicas e os tipos de deposições correspondem a coralóides, crostas ou escorrimentos, represas de sílica, sendo que há predomínio de coralóides em todas as cavidades. A FIG. 7.6 registra alguns depósitos químicos recorrentes nas cavidades investigadas. Embora os espeleotemas tenham dimensões pequenas se comparado aos desenvolvidos em rochas carbonáticas, eles registram que o processo de deposição mineral secundário ocorre e está ativo nas cavidades em estudo.

Alguns depósitos químicos foram selecionados para análise química e a interpretação ocorreu de forma qualitativa conforme os seguintes critérios: a) características macroscópicas de deposição mineral; b) imagens microquímicas; c) composição química geral das camadas de deposição e d) distribuição qualitativa dos principais elementos químicos em cada camada de deposição na projeção linear (EDS Linha).

O QUADRO 7.1 mostra a relação de amostras de depósitos químicos selecionados para análise e interpretação, bem como suas características morfométricas. Destaca-se que em geral as amostras possuem espessura média de 5cm, a extensão varia de 4,0 a 19,0cm e a largura oscila entre 6,0 e 15,5cm.

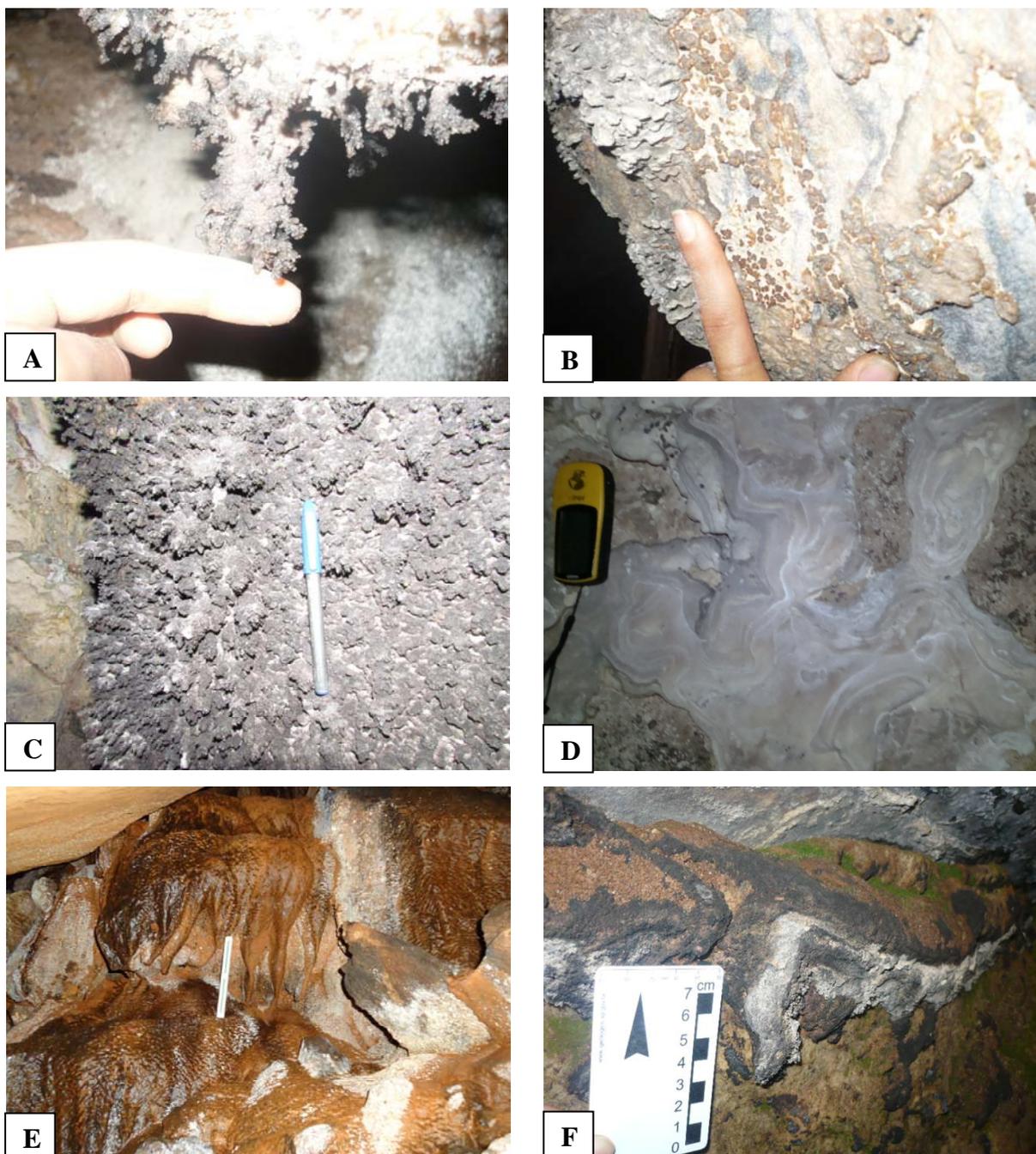


FIGURA 7.6 - Deposição química nas cavidades na região SE de Diamantina. Coralóides (A; B;C); escorrimentos (D, F), represa de sílica (E).

Obs: Escalas: C = Caneta para retroprojctor (cm), D = GPS (cm) E = escalímetro (15cm)

Fotos: Souza, F. C. R. (A, B, D); Lopez, F. A. (C, E, F)

QUADRO 7.1

Depósitos químicos selecionados para análise

Nº da amostra	Tipo de amostra	Cavidade	Características morfométricas		
			Extensão (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)
GSV01	Escorrimento	Gruta das Sempre Vivas	16,5	6,5	4,3
GE02	Estalagmite ⁴⁵	Gruta Extração	8,7	6,5	6,0
GE03	Estalagmite	Gruta Extração	4,0	6,0	5,0
GE04	Estalagmite	Gruta Extração	16,0	7,0	6,0
GE05	Escorrimento	Gruta Extração	19,0	15,5	3,0
GS06	Escorrimento	Gruta do Salitre	12,5	10,8	3,0

7.2.1. Características Macroscópicas

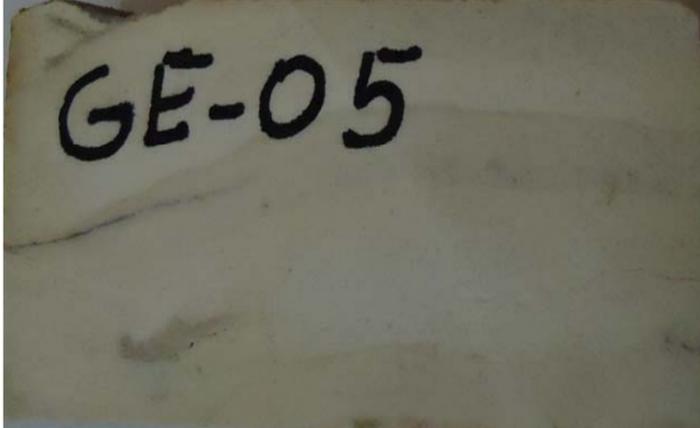
O QUADRO 7.2 apresenta as características macroscópicas dos escorrimentos da Gruta das Sempre Vivas, Gruta Extração e Gruta do Salitre. A amostra da Gruta das Sempre Vivas possui camadas de deposição finas e onduladas. Os escorrimentos da Gruta Extração e Gruta do Salitre possuem camadas de reprecipitação química mais espessas (0,5 a 1,5cm) em relação às camadas da Gruta das Sempre Vivas. Observa-se que, em geral, as camadas de deposição química inferiores são mais espessas que as superiores. Essas características podem indicar a ocorrência de períodos úmidos que favorecem maior precipitação de minerais e posteriormente ocorreram quedas nas taxas de umidade, o que ocasionou a redução na espessura das camadas de deposição química.

As microestalagites são espeleotemas da Gruta Extração e apresentam características macroscópicas diferentes. Registra-se que cada amostra possui cor e tamanhos diferentes, as camadas de deposição, em geral, são finas e onduladas. Essas deposições possuem tonalidades de cor da parte central mais claras (GE02 e GE04) ou mais escuras (GE03) que as camadas das extremidades. Destaca-se também diferentes características na relação entre concentração mineral e espaços porosos. As informações disponíveis até o momento não permitem o levantamento de hipóteses que explicam as diferenças nas características macroscópicas.

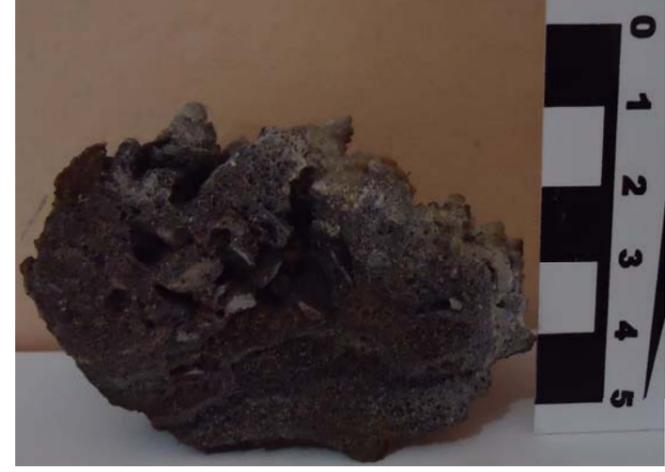
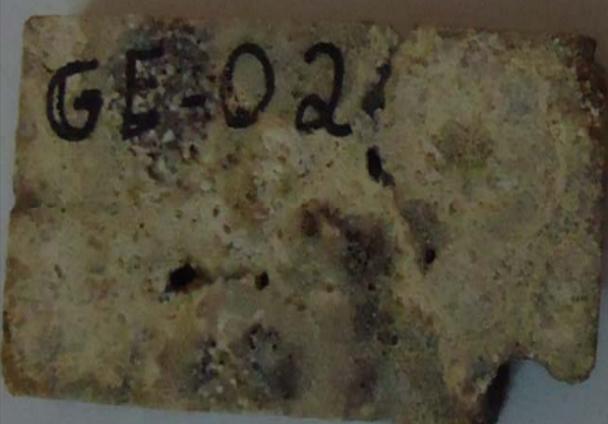
⁴⁵ Neste trabalho o termo estalagmite refere-se também a pendentes, visto que a maioria deste espeleotemas não apresenta canudos de refrigerante.

QUADRO 7.2

Características macroscópicas de escorrimentos

Nº da amostra	GSV01	GE05	GS06
Cavidade	Gruta das Sempre Vivas		
	Gruta Extração		Gruta do Salitre
Amostra			
Detalhes macroscópicos			
Lâmina da amostra			

QUADRO 7.3
Características macroscópicas de estalagmites

Nº da amostra	GE02	GE03	GE04
Cavidade	Gruta Extração	Gruta Extração	Gruta Extração
Amostra			
Detalhes macroscópicos			
Lâmina da amostra			

As características físicas dos depósitos químicos foram observadas em microscópio óptico (QUADRO 7.4). Nesse microscópio com aumento de até 10x foram observadas minerais de forma amorfa e alguns fragmentos de quartzo e foi possível observar com maiores detalhes as camadas de deposição. Em geral, observa-se que as camadas de deposição dos escorrimentos são mais espessas (0,2 a 0,5mm) que as camadas das estalagmites (0,1 a 0,4mm). Com base nas características físicas observadas no microscópio óptico foram selecionadas zonas para interpretação química no MEV FEG Quanta200 e EDS. As zonas de análise foram selecionadas conforme variação na tonalidade de cores das deposições e principalmente em variações na relação entre concentração do precipitado químico e espaços porosos. A quantidade de zonas para análise microquímica está explícita no QUADRO 7.4, nos escorrimentos foram selecionadas uma zona (GSV01, GE05 e GS06) e nas estalagmites interpretou-se duas (GE03) ou três (GE02 e GE04) zonas em cada amostra.

QUADRO 7.4

Características físicas das amostras observadas em microscópio óptico

Espeleotemas	Nº da amostra	Observação Microscópio óptico	Zonas de análise microquímicas
Escorrimentos	GSV01	Camadas de deposição 0,2mm Presença de quartzo com camadas de reprecipitação química	1
	GE05	Homogeneidade da composição mineral; Espaços porosos menores de 0,2mm	1
	GS06	Homogeneidade na composição mineral Camadas de 0,5mm	1
Estalagmites	GE02	Presença de material amorfo com tons de cinza diferentes.	3
	GE03	Camadas espessas (1mm) Presença de mineral fino e alongado entre camadas.	2
	GE04	Precipitação mineral em camadas Presença de poros 0,2 a 0,4mm.	3

7.2.2. Imagem Microquímica dos Espeleotemas

A FIG. 7.7 mostra algumas imagens microquímicas dos espeleotemas analisados. Registra-se que os escorrimentos apresentam a estruturação das camadas de deposição química e algumas fissuras (A). Além disso, observa-se a presença de fragmentos de quartzo nas amostras de escorrimentos, principalmente na Gruta Extração (GE05) e Gruta do Salitre (GE06) (C e D). As estalagmites apresentam minerais de formas diversificadas e alguns minerais de quartzo (D, G, L).

7.2.3. Concentração Química Geral

A FIG. 7.8 mostra a concentração química geral nas amostras de escorrimentos das Grutas: das Sempre Vivas, Extração e do Salitre. Destaca-se que, em geral, os escorrimentos apresentam silício (Si) como o principal componente químico, seguido de oxigênio (O) e carbono (C). O escorrimento da Gruta das Sempre Vivas também apresenta fósforo (P) e cálcio (Ca) na sua composição e as amostras da Gruta do Salitre, por sua vez, possuem em baixas concentrações alumínio (Al), cloro (Cl), enxofre (S) e bário (Ba).

A concentração química total nas estalagmites da Gruta Extração (GE2) nas zonas 1 e 3 são compostas predominantemente por Ca, P, O, C (FIG. 7.9A e B). Destaca-se que em ambas as zonas S e Si estão presentes em concentrações intermediárias. Registra-se que devido ao contexto geológico de formação das cavidades, a concentração de Ca nas amostras merece destaque.

A estalagmite GE03 da Gruta Extração apresenta concentrações químicas diferentes nas zonas 1 e 2 (FIG. 7.10 A e B). A zona 1 é constituída principalmente por Si, O, Fe e C. A zona 2, por sua vez, é composta por uma variedade de elementos químicos, as maiores concentrações são de Si, Ma, Ba e S e as menores concentrações são de Ca, Al, Fe, K e P.

A concentração química total nas amostras de estalagmites da Gruta Extração (GE04) nas zonas 1, 2 e 3 estão representadas nas FIG. 7.11A, B e C, respectivamente. Registra-se a concentração predominante de Ca em todas as zonas de deposição. A zona 1 apresenta concentrações de Ca, P, S, O, Si e Al. A zona 2 concentra em forma decrescente Ca, P, S, O, Si, C e Al. A zona 3, por sua vez, constitui-se predominantemente de Ca e P e em menores concentrações há S, O, C, Si e Al.

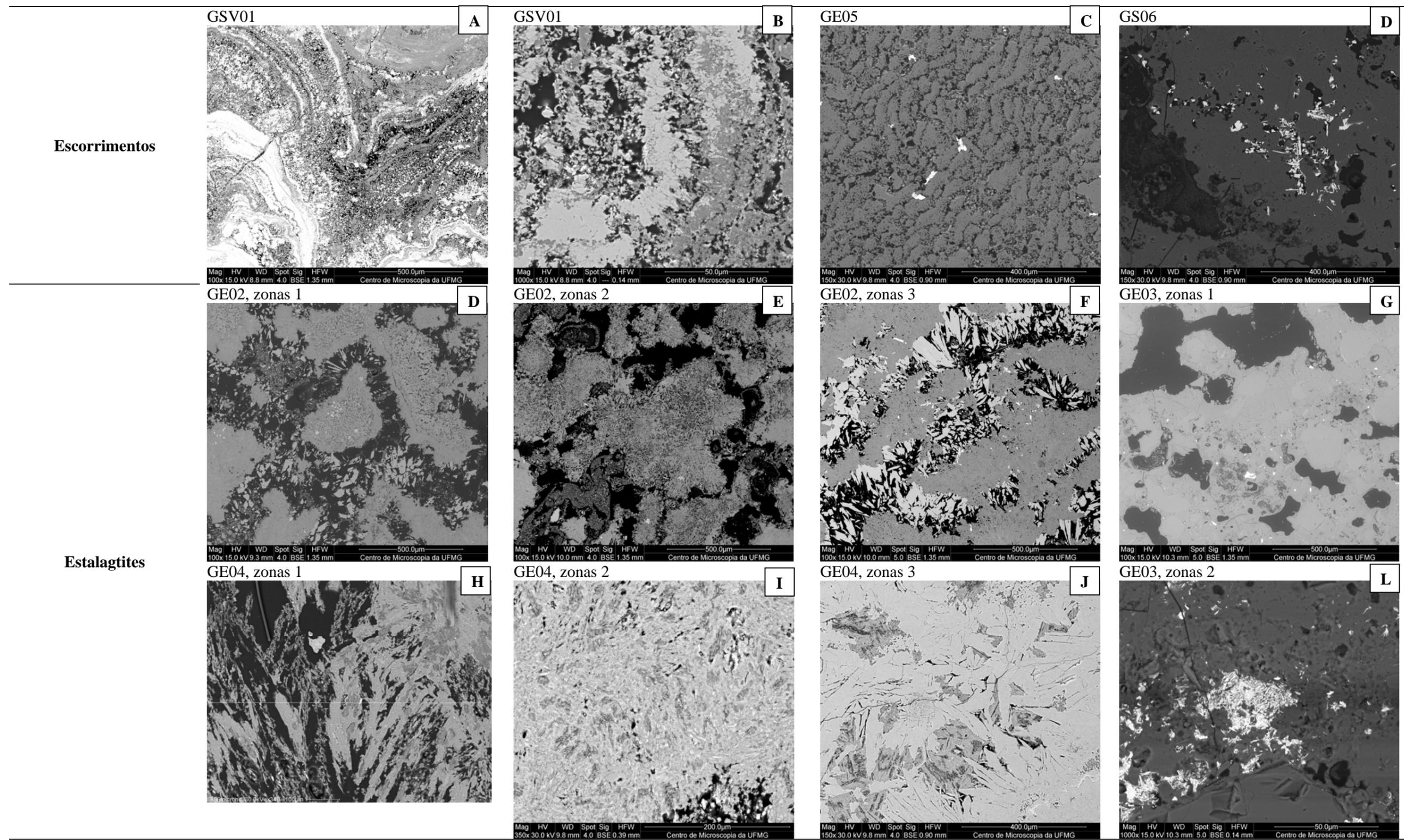
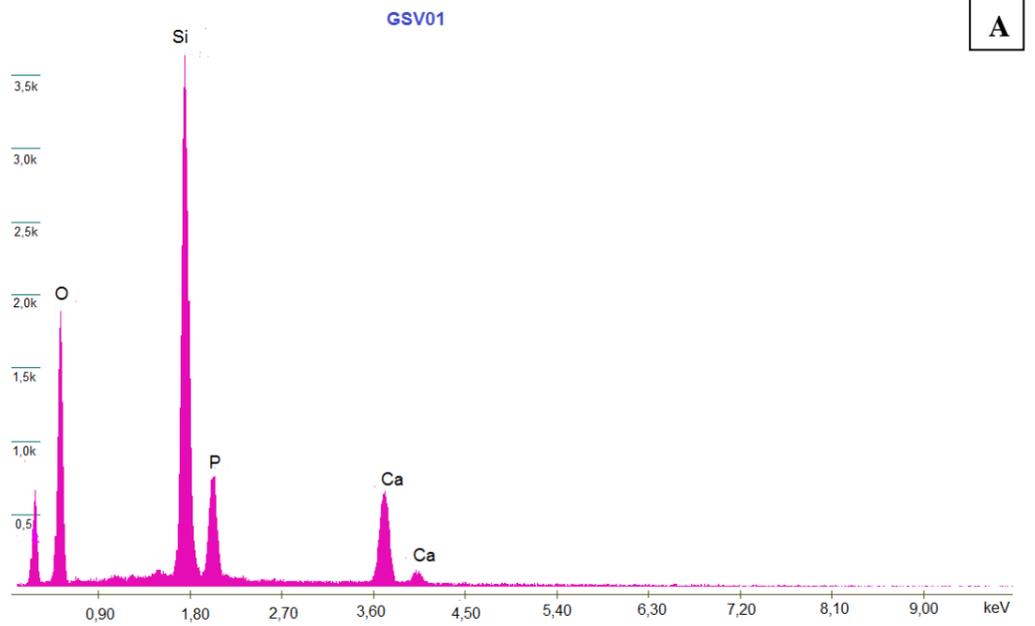
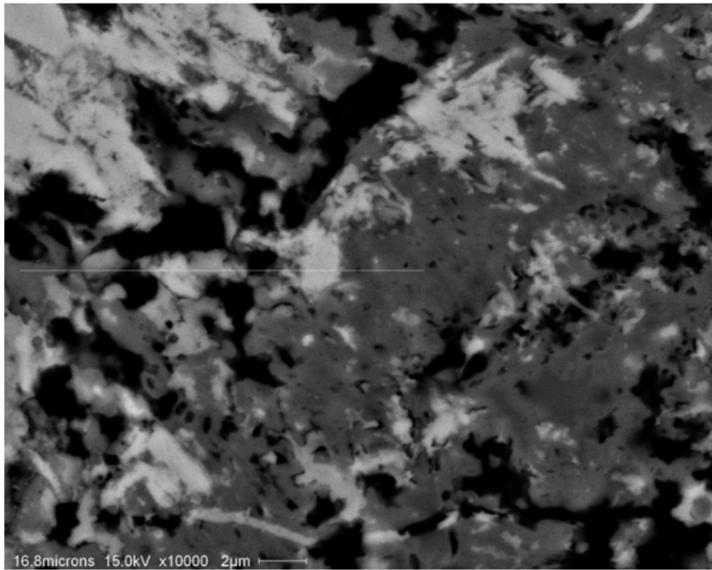


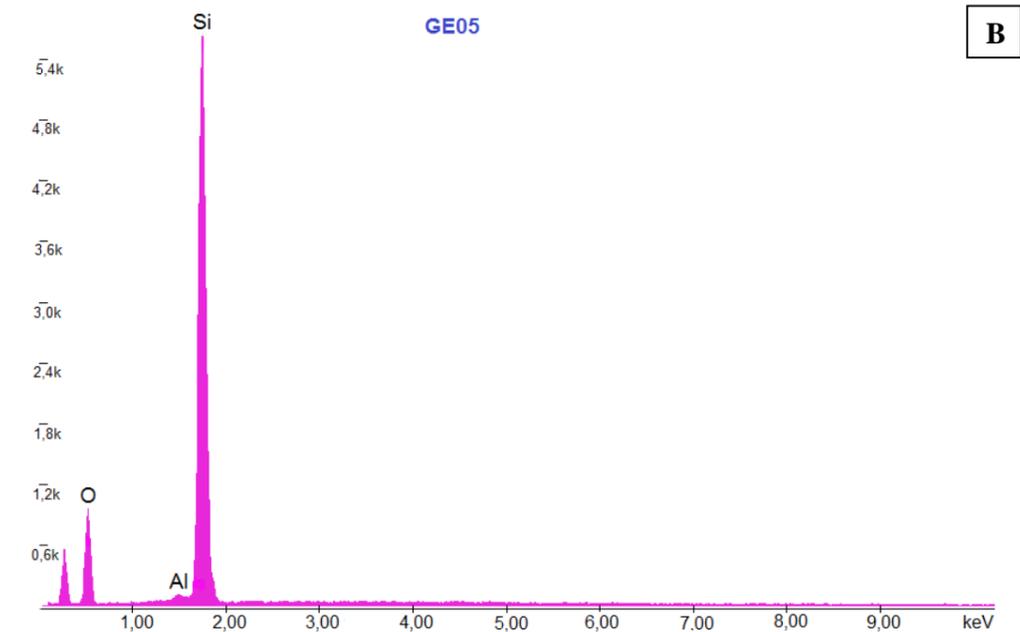
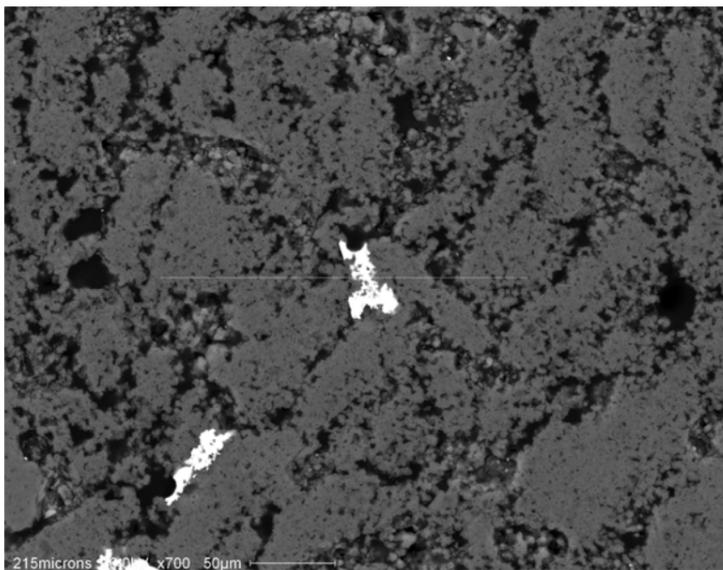
FIGURA 7.7. Depósito químico de escorrimentos (A e B) Gruta das Sempre Vivas (GSV01), (C) Gruta Extração (GE05), (D) Gruta do Salitre (GS06) e estalagmites da (E, f e G) Gruta Extração GE02, zonas 1, 2 e 3, (H, L) GE03 zonas 1 e 2 e (H, I e J) GE04 zonas 1, 2 e 3

GSV01



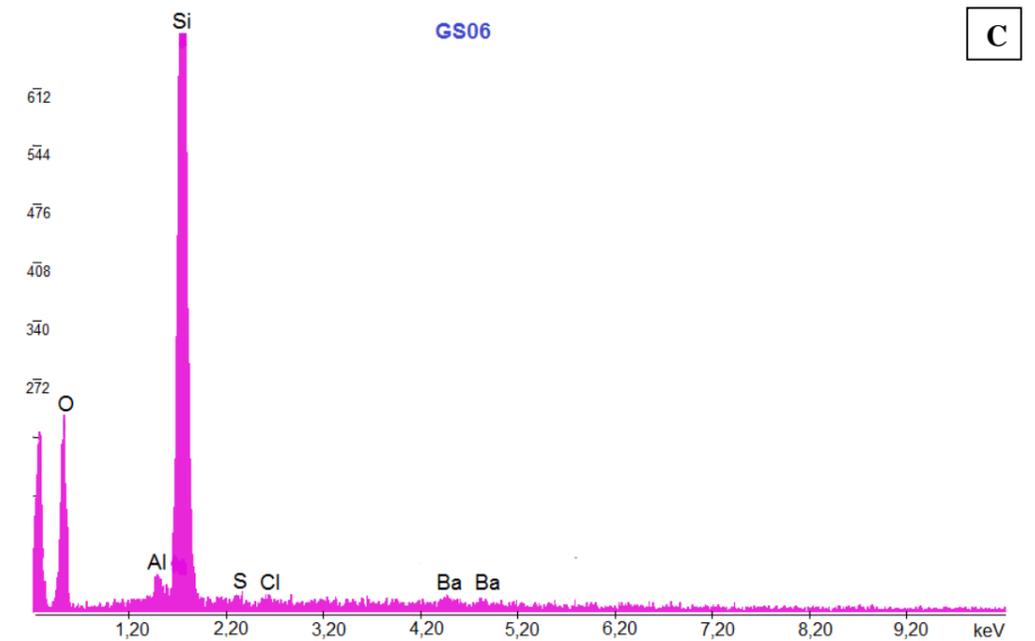
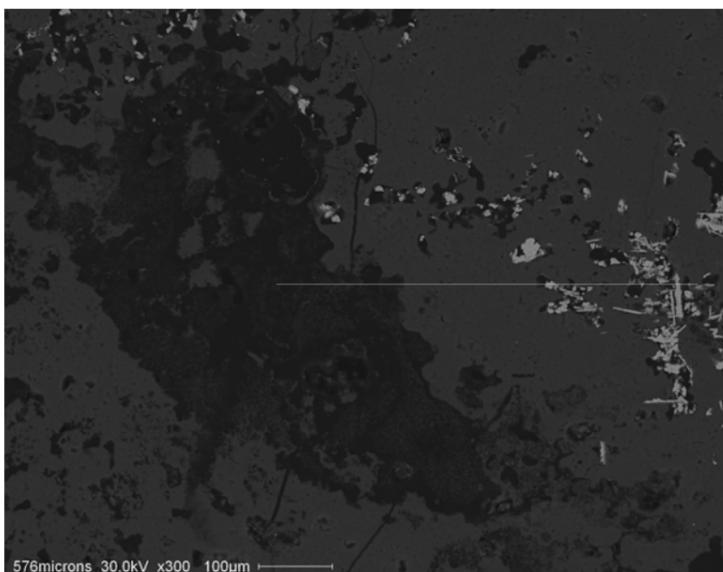
A

GE05



B

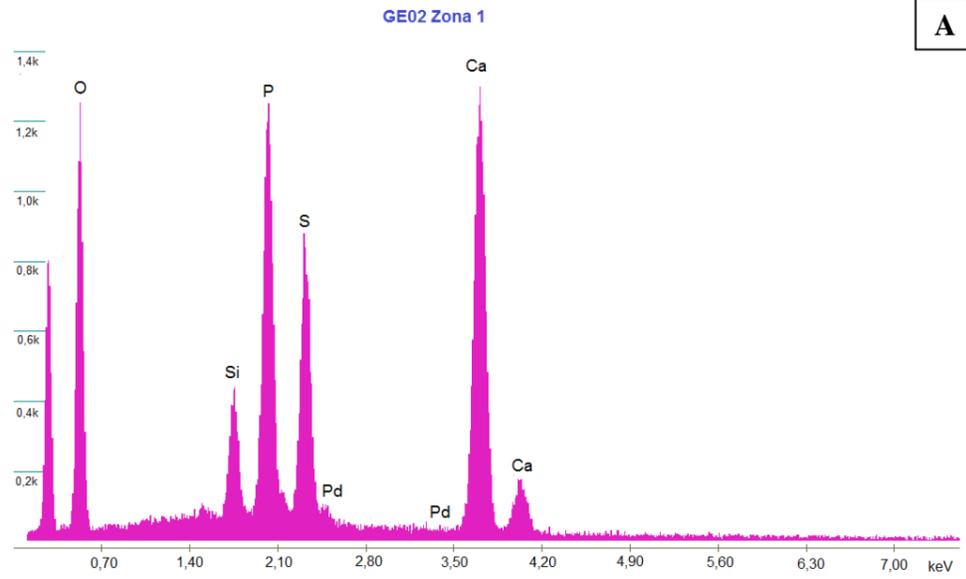
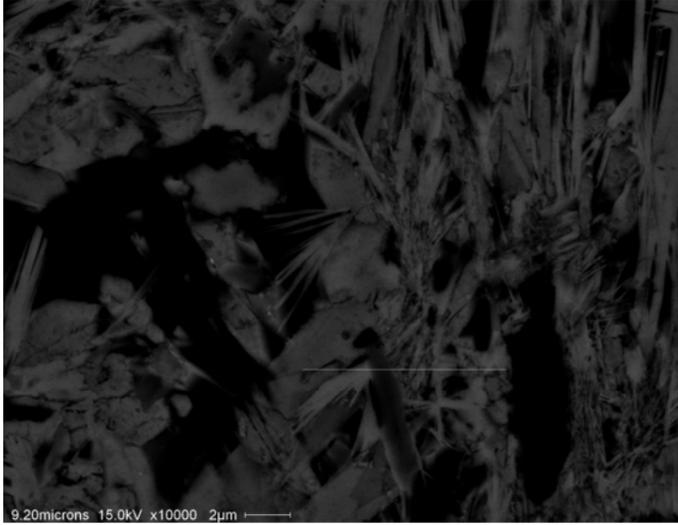
GS06



C

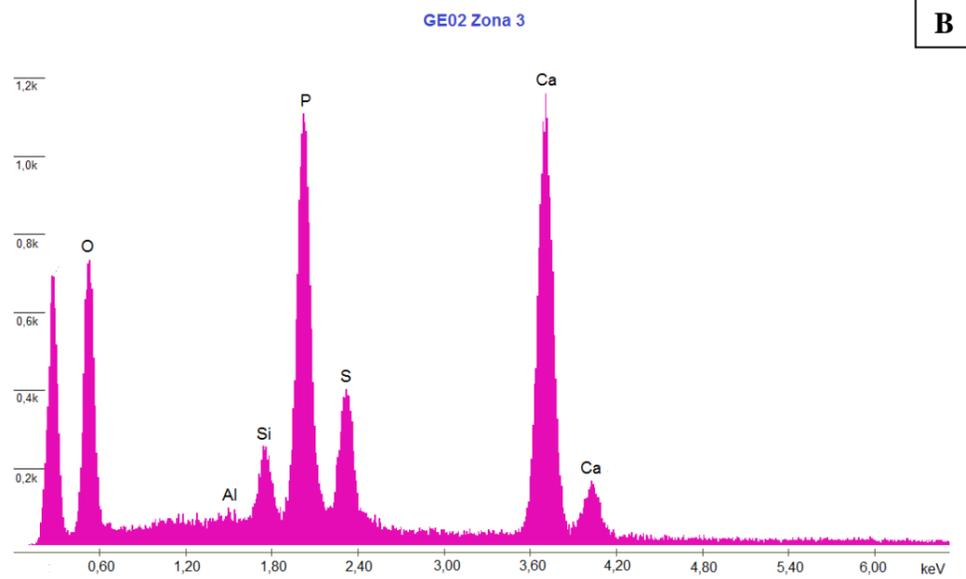
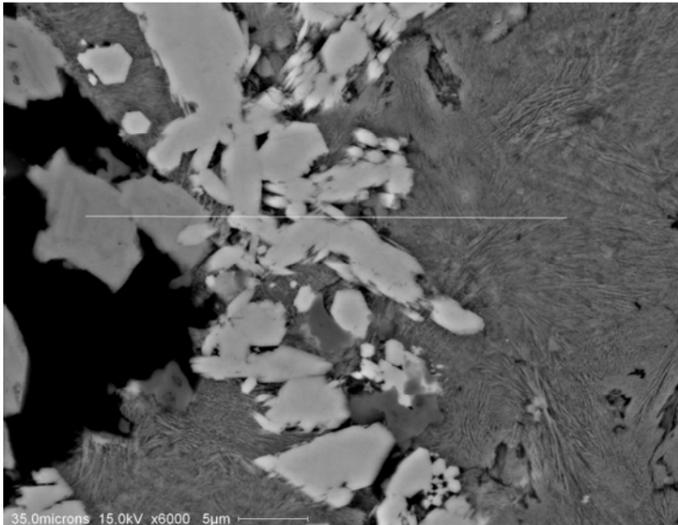
FIGURA 7.8 - Concentração Química Geral nas amostras de escorrimentos. GSV 01: Gruta das Sempre Vivas (A). GE05: Gruta Extração (B), GS06: Gruta do Salitre (C).

GE02 Zona 1



A

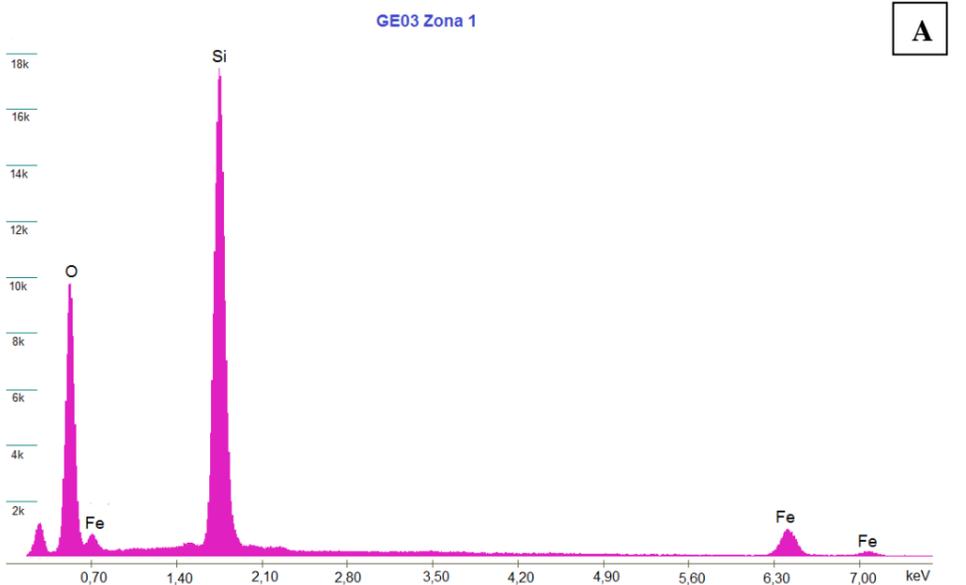
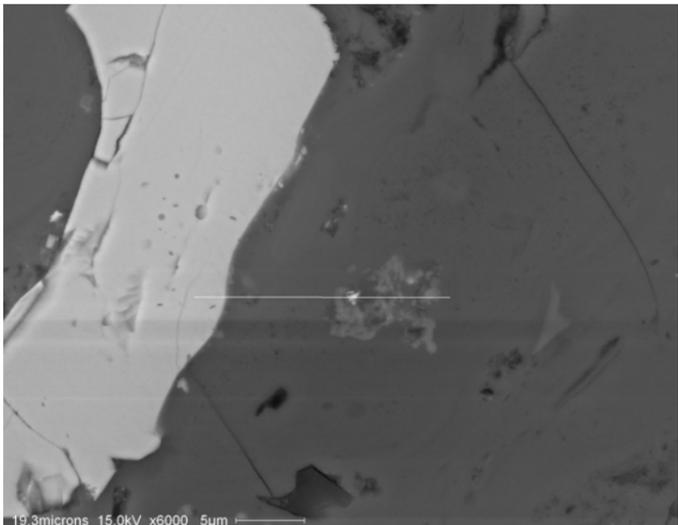
GE02 Zona 3



B

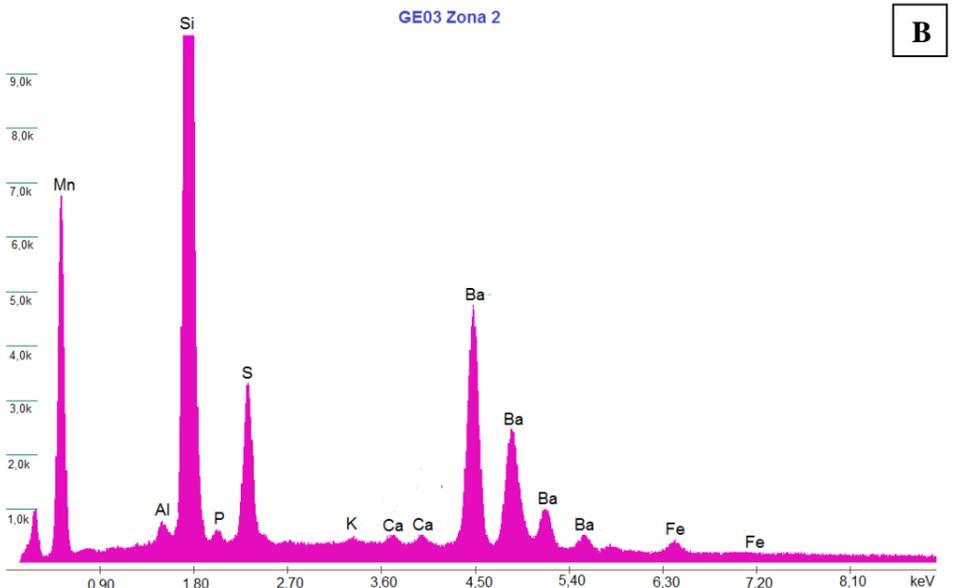
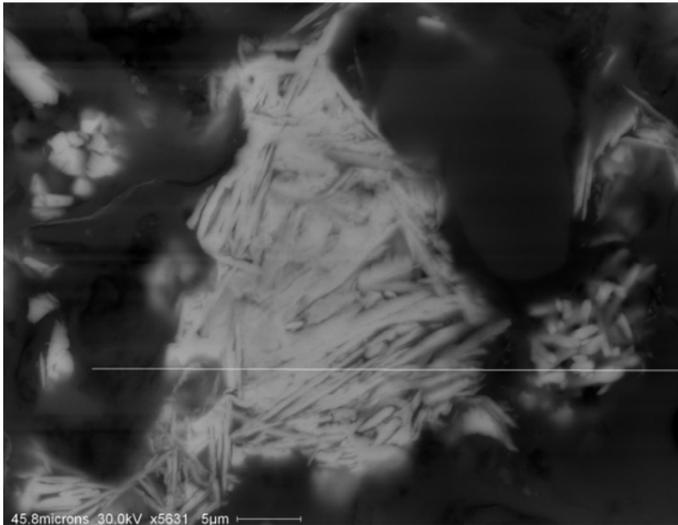
FIGURA 7.9 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites. GE02: Gruta Extração, zona 1 (A) e zona 3 (B).

GE03 Zona 1



A

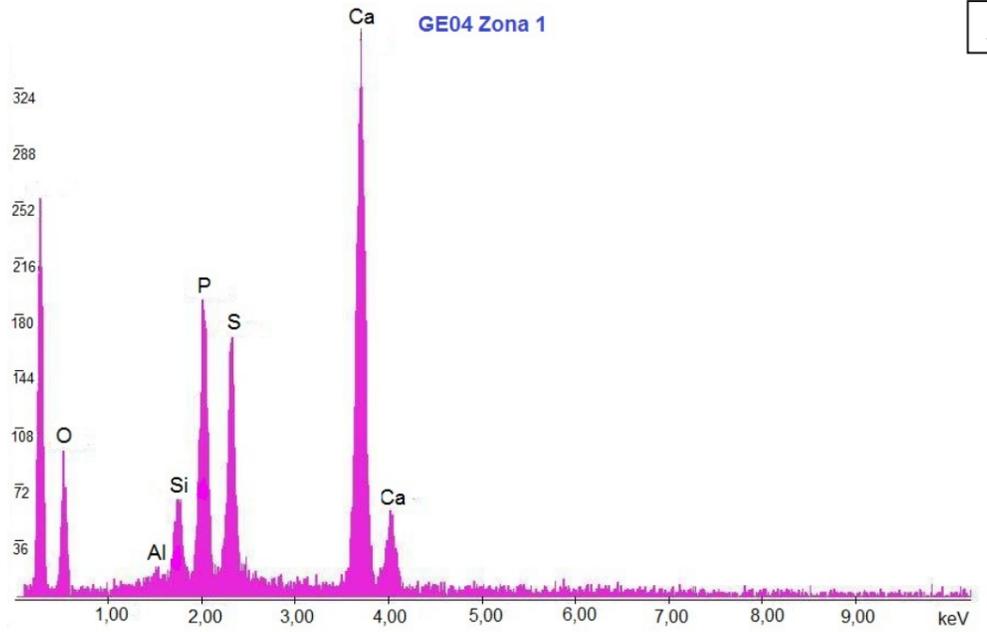
GE03 Zona 2



B

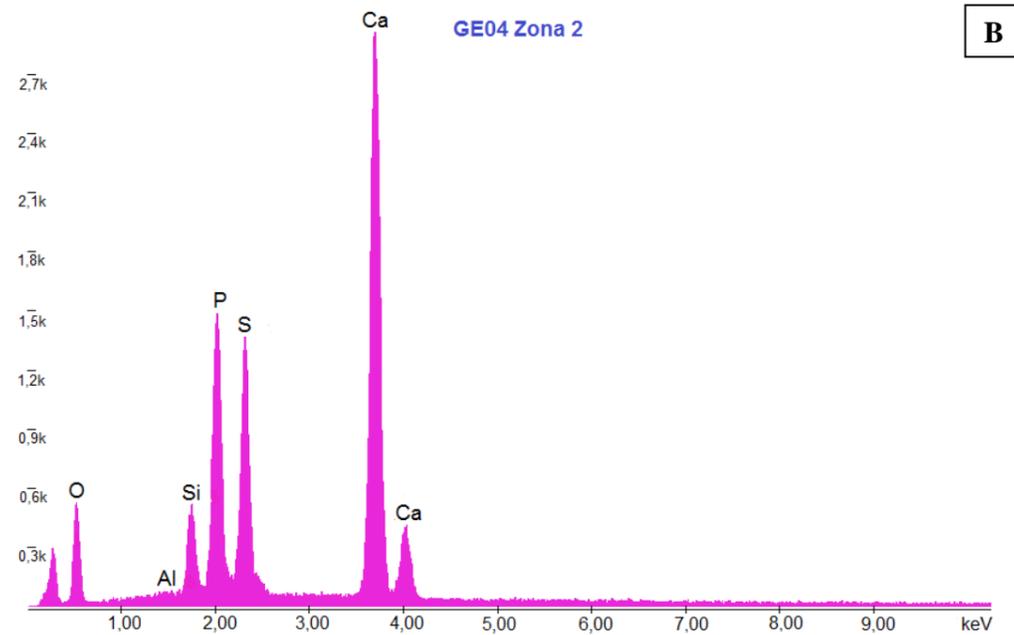
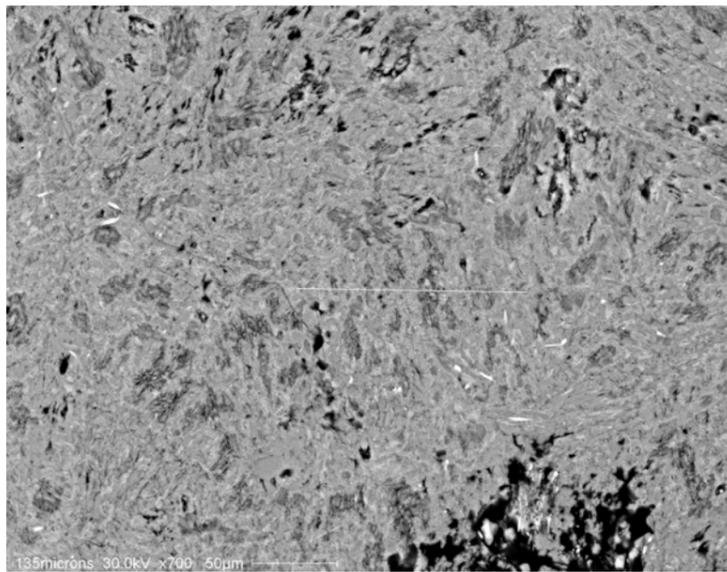
FIGURA 7.10 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites. GE03: Gruta Extração, zona 1 (A) e zona 2 (B).

GE04 Zona 1



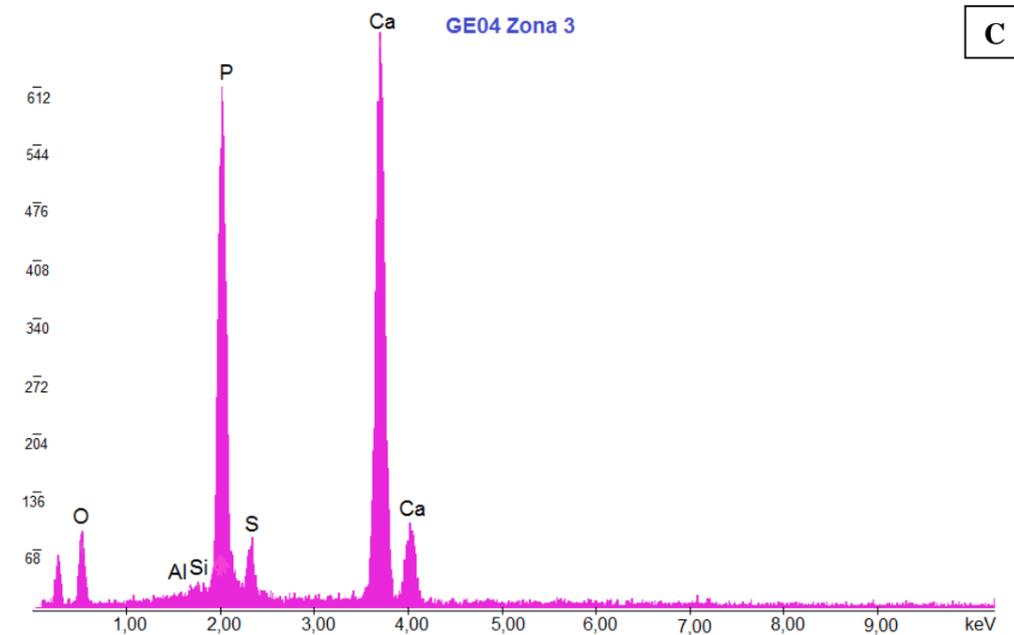
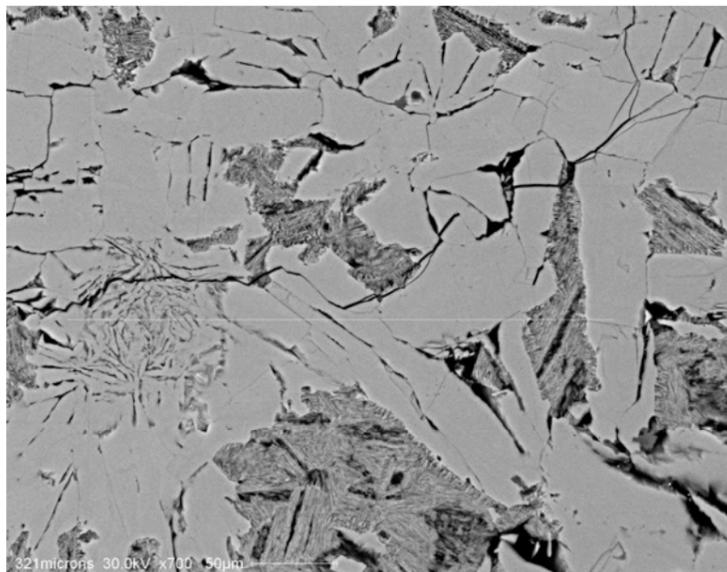
A

GE04 Zona 2



B

GS04 Zona 3



C

FIGURA 7.11 - Concentração Química Geral nas amostras de estalagmites. GE04: Gruta Extração, zona 1 (A), zona 2 (B) e zona 3 (C).

7.2.4. Distribuição dos Elementos Químicos nas Amostras

A FIG. 7.12 mostra como os principais elementos químicos identificados estão distribuídos nas amostras de escorrimentos da Gruta das Sempre Vivas (A), Gruta Extração (B) e Gruta do Salitre (C). A amostra da Gruta das Sempre Vivas (GSV01) apresenta distribuição química dos seguintes elementos químicos: na lateral esquerda á predominantemente Si e O, posteriormente tem-se acréscimo de Ca, P e C e na parte direita da linha há maior concentração de Si e O (FIG. 7.12A).

O escorrimento da Gruta Extração (GE05) apresenta predomínio em geral de Si e O e pontualmente há concentração de C, que situa-se predominantemente nos pontos escuros da amostra (FIG. 7.12B). O escorrimento da Gruta do Salitre (GS06), no sentido da esquerda para a direita da linha possui maior concentração de Si e C, na parte central há de Si e O e a lateral direita há predomínio de Si, O, Ba, Ca e S (FIG. 7.12C).

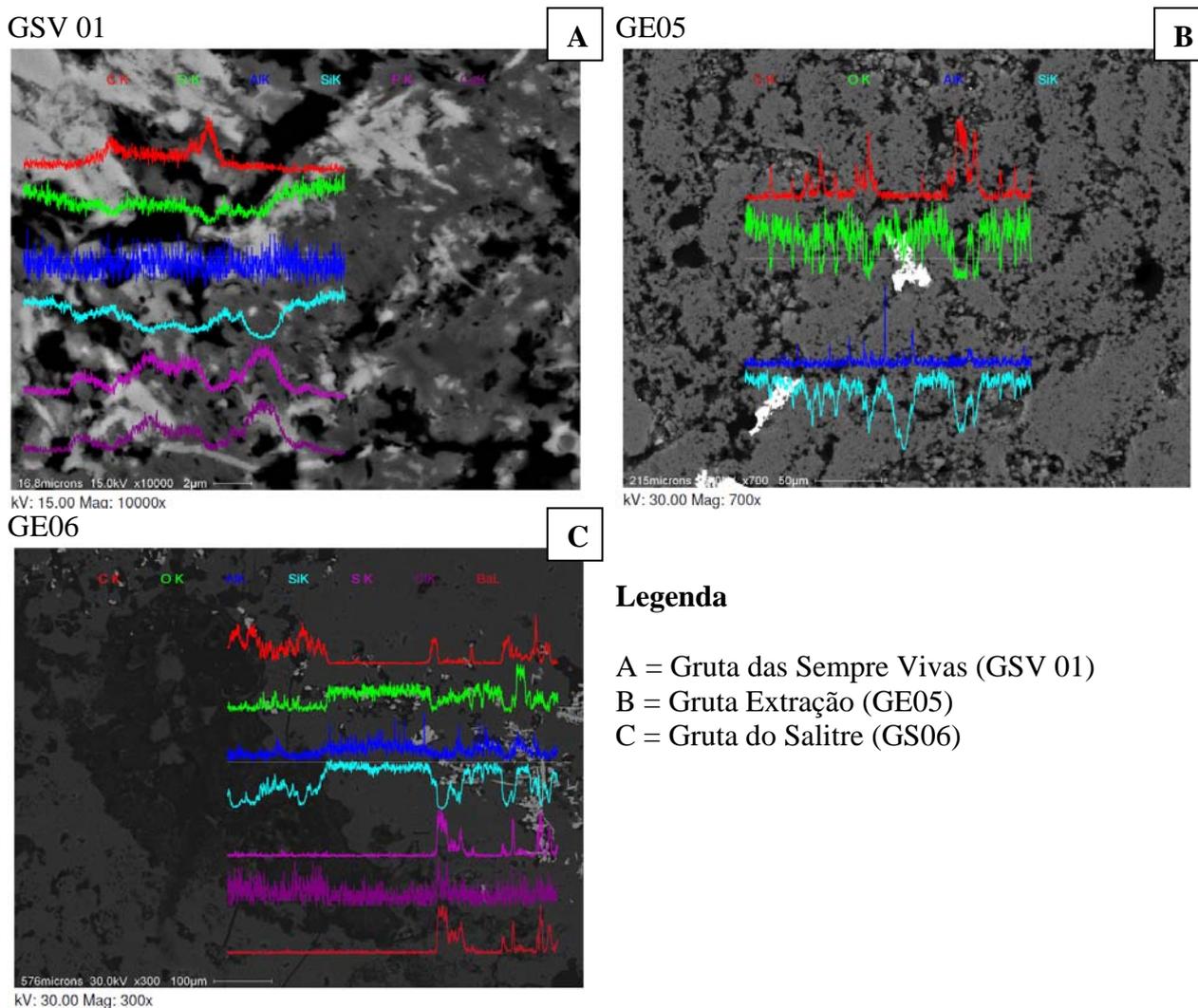


FIGURA 7.12 – Distribuição de cada elemento químico em amostras de escorrimentos.

As estalagmites da Gruta Extração apresentam variações na distribuição dos elementos químicos na amostra. A amostra GE03 apresenta duas zonas principais. A zona 1 possui principalmente Fe e a porção direita da linha é composta basicamente de Si e também observa-se que O, C possuem baixas concentrações em todas as porções da amostra. A zona 2, por sua vez, é composta por uma variedade de elementos químicos, que inclui C, Si, Al, Ba, S, Fe, K, C, F e Na (FIG. 9.13D). A análise EDS Linha permite interpretar a concentração de Si e Al principalmente na lateral esquerda, na parte central há predomínio de Ba e S e na lateral direita observa-se principalmente Si, O, C, Ca, Ba e S (FIG. 9.13H).

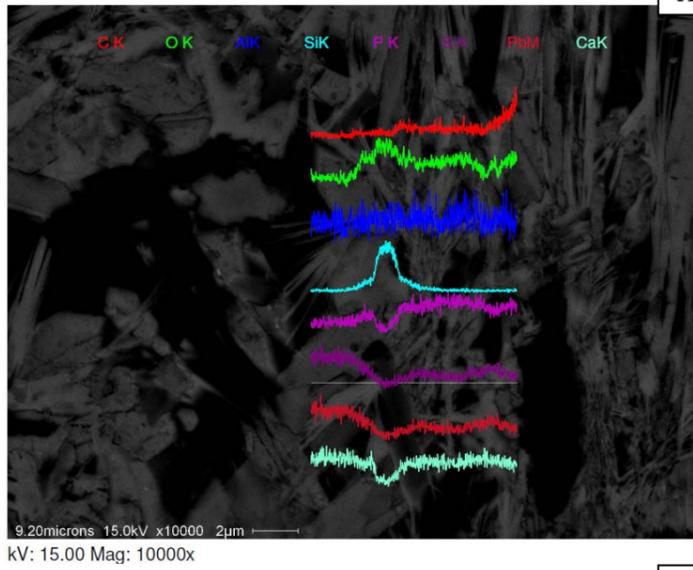
A amostra GE02 possui três zonas com variedade de elementos químicos. A zona 1 apresenta um pico pontual na porção central da amostra composto por Si e O, na porção esquerda concentra-se P, S, Pb e Ca e à direita identifica-se principalmente P, C, S e Ca (FIG. 9.13A). Destaca-se que no ponto com concentração de Si e O não identifica-se mineral de quartzo e, possivelmente corresponde à sílica amorfa. A zona 2 possui distribuição homogênea dos elementos químicos, a composição predominante é O, mas também identifica-se C, Na, Al, Si, P, S, Pb e Ca (FIG. 9.13B). Na zona 3 identifica-se especialmente P e Ca na lateral esquerda e S, Pb e C na porção direita. Além disso, observa-se a presença de Na, Al e Si em toda a amostra da zona 3 (FIG. 9.13C).

A amostra GE04 também apresenta variedade na composição química em todas as zonas de deposição. A zona 1 possui principalmente C, P, S e Ca, mas observa-se também a presença de O, Al e Si (FIG. 9.13E). Na zona 2 há predomínio de S, P e Ca e em menores concentrações identifica-se C, Si, O e Al (FIG. 9.13F). A zona 3, por sua vez, é composta especialmente por P e Ca e na lateral direita nota o predomínio de S e C (FIG. 9.13G).

A FIG. 7.14 mostra os diagramas de cada elemento químico dos espeleotemas analisados e permite a correlação entre as amostras. Observa-se que, em geral, o teor de Si e O nos escorrimentos é maior que nas estalagmites. Nos escorrimentos o Ca foi identificado apenas na Gruta das Sempre Vivas e nas estalagmites esse elemento químico está presente qualitativamente em altas concentrações em todas as amostras.

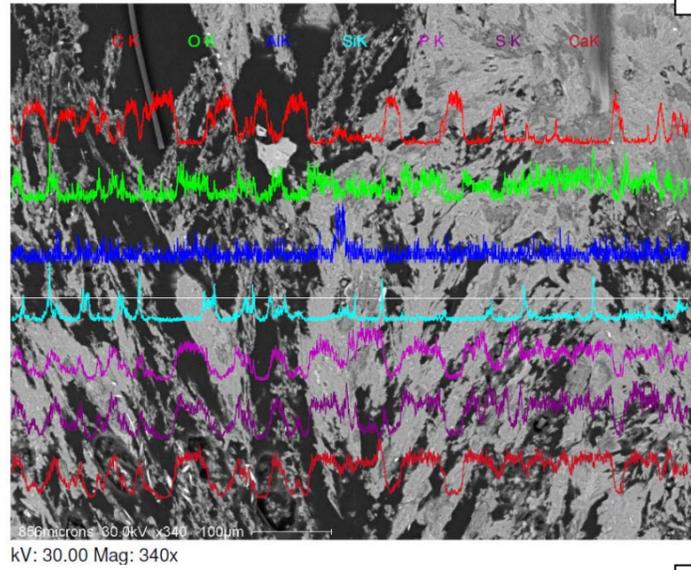
Destaca-se que, em geral, as estalagmites possuem variedade na composição química superior aos escorrimentos. Além disso, a concentração e distribuição de Ca é destaque, todavia, nota-se que as imagens não evidenciam a presença de calcita nas amostras. Neste sentido, a concentração de Ca pode estar associado à presença de feldspato cálcico na rocha matriz. A presença de C nas amostras está associada à metalização realizada durante a preparação da amostra com esse material.

GE02 Zona1



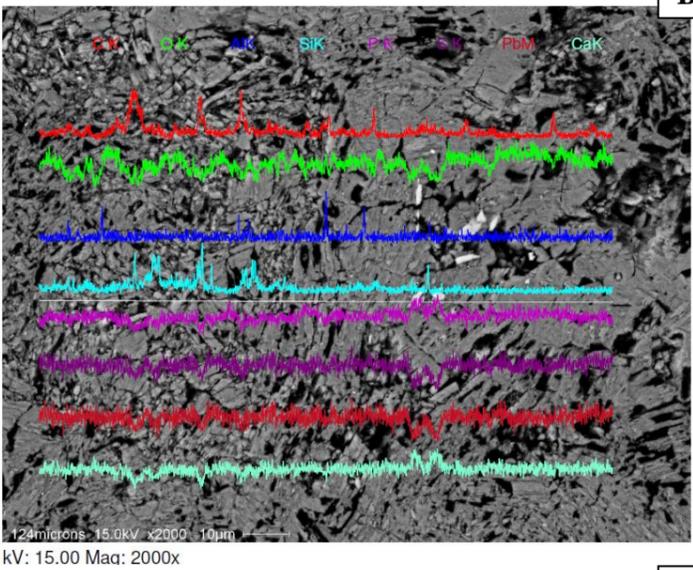
A

GE04 Zona1



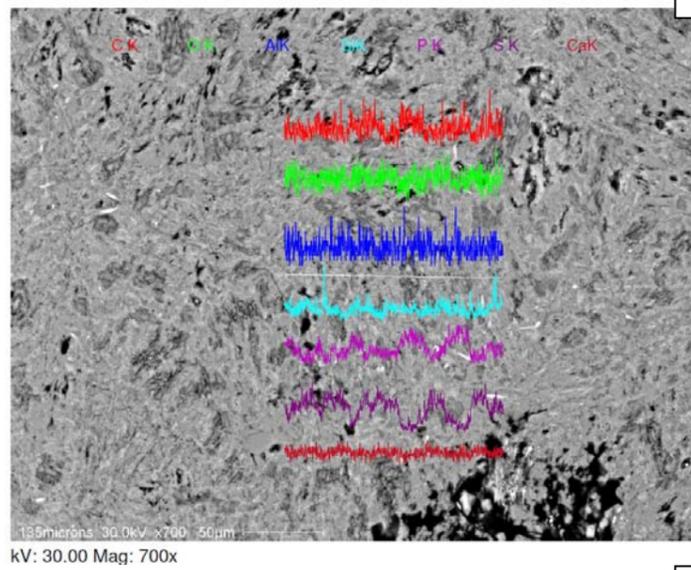
E

GE02 Zona2



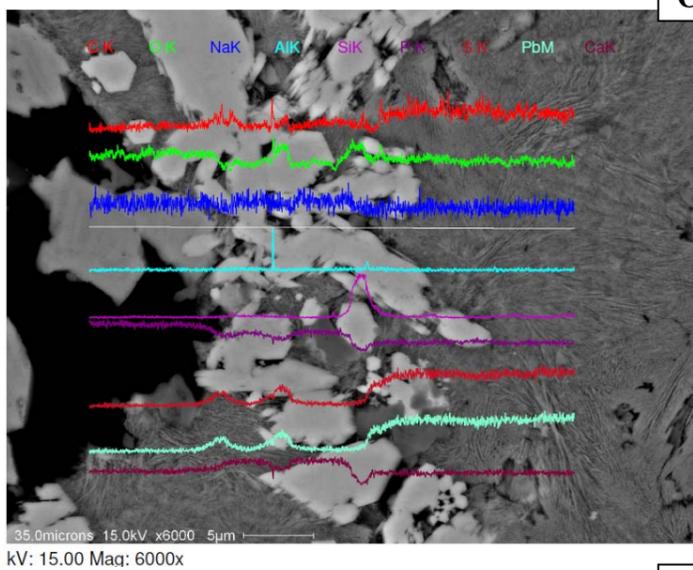
B

GE04 Zona2



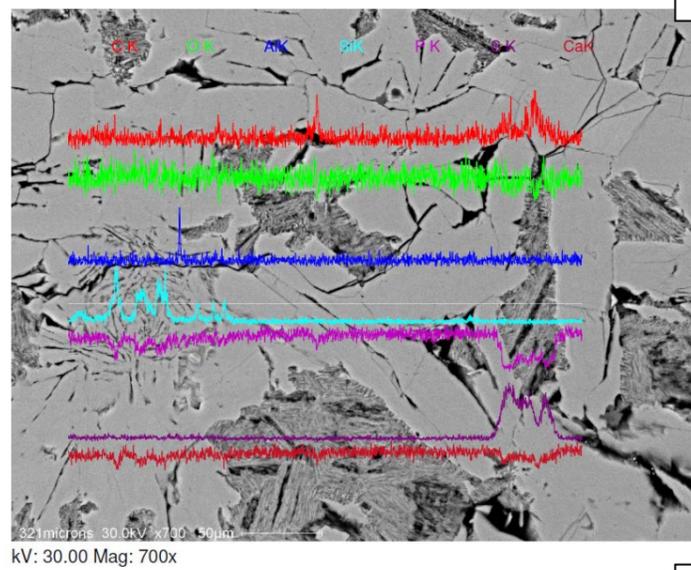
F

GE02 Zona3



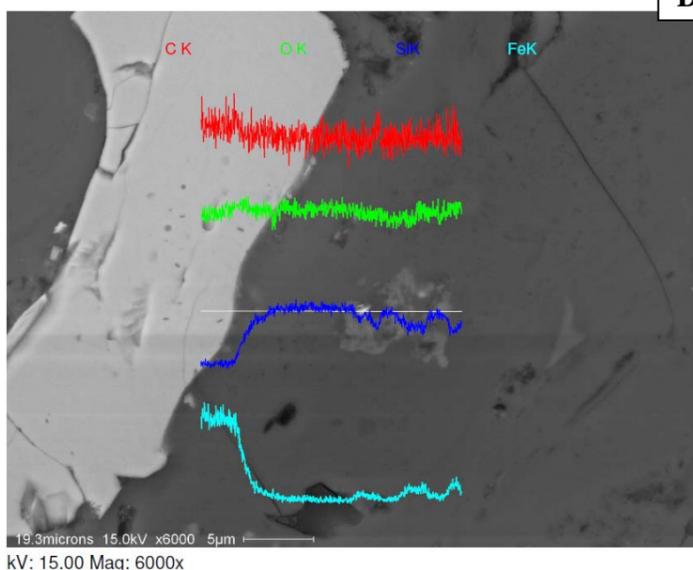
C

GE04 Zona3



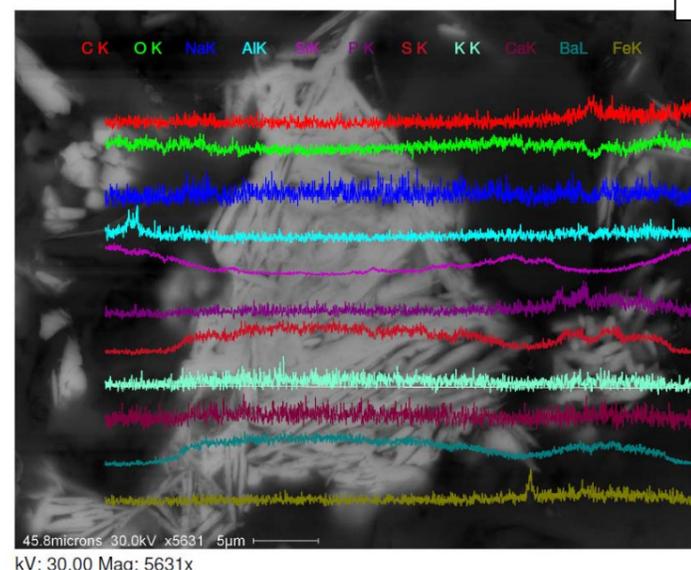
G

GE03 Zona1



D

GE03 Zona2



H

FIGURA 7.13 - Distribuição química de cada elemento químico em amostras de estalagmites. GE02: Gruta Extração, zona 1 (A), zona 2 (B) e zona 3 (C). GE04: Gruta Extração, zona 1 (D), zona 2 (E) e zona 3 (F). GE03: Gruta Extração, zona 1 (D) e zona 2 (E).

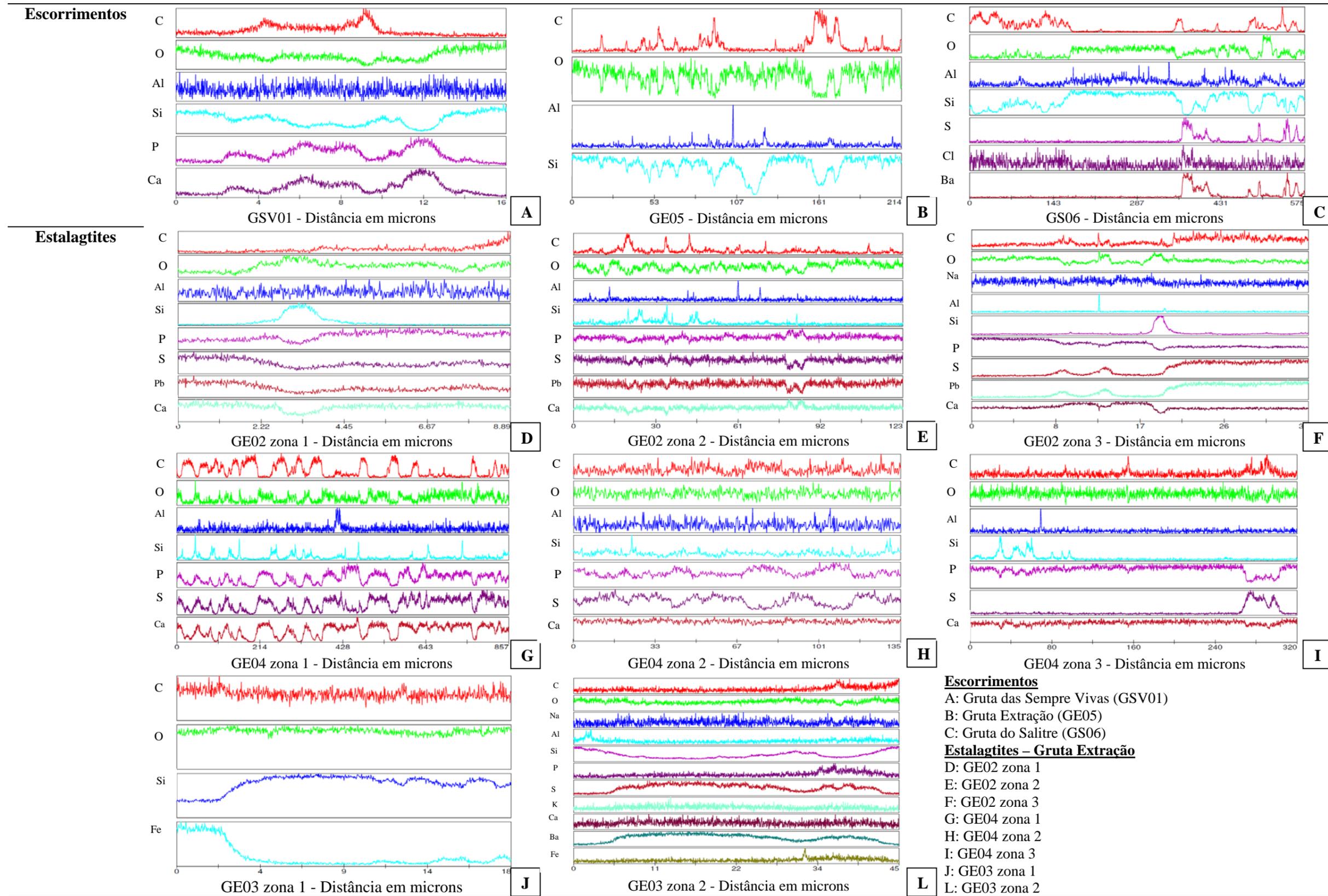


FIGURA 7.14 - EDS Linha. Distribuição química de cada elemento químico nos espeleotemas.

7.3. Discussões

A quantidade de estudos sobre depósitos clásticos em cavidades desenvolvidas em quartzitos é pouca e voltada, principalmente, para a identificação geral dos tipos existentes. A descrição, caracterização, datação ou outros procedimentos técnicos e científicos para depósitos clásticos estratificados nesse tipo de cavidade ocorre em poucos trabalhos. Na região SE de Diamantina a presença de depósitos clásticos estratificados em algumas cavidades (Gruta do Salitre, Gruta Monte Cristo, Gruta Extração e Gruta Curralinho) com fácies plano paralelas compostas predominantemente por materiais de textura arenosa ou arenoso siltosa, intercalada em algumas ocasiões com fácies com seixos. Essas características indicam que alguns condutos das cavidades foram preenchidos por material dentrítico associado a fluxo fluvial, predominantemente lento.

A caracterização e análise química geral de depósitos químicos desenvolvidos em cavidades em rochas siliciclásticas foram realizadas por alguns autores (WRAY, 1999; WILLEMS *et al.*, 2002; WILLEMS, 2006; CIOCCALE *et al.*, 2008; AUBRECHT *et al.*, 2011; DEVÈS *et al.*, 2012). Wray (1999) e Lino (2009) mencionam que a cor dos espeleotemas é variável devido à presença de impurezas na rocha. Por isso, destaca-se que a variedade de elementos químicos identificados nas amostras de depósitos químicos na área de estudo pode está associada a composição dos quartzitos e metaconglomerados que ocorrem localmente. Através de difratometria de raio-X e lâminas delgadas Fabri (2011) identificou apenas sílica presente na forma de quartzo e opala-A nas amostras de espeleotemas da região de Itambé do Mato Dentro.

Através de difração de raio-X Aubrecht *et al.*, (2011) identificaram a presença pitofilita, caolinita, quartzo e, em algumas camadas de deposição há goethita em amostras de estalagmites de cavidades na Venezuela. Os autores argumentam que quartzo pode representar opala A, pois o pico localiza-se no ponto desse mineral. Devès *et al.* (2012) interpretam depósitos químicos com base em métodos de microanálises, autodiografia de elementos radioativos e microespectrometria de fluorescência de raio-X em amostras coletadas em cavidades do leste da Sibéria. Devès *et al.* (2012) observaram a presença principalmente de Ca, U, Sr e Si.

Estudos com depósitos químicos com o uso do MEV e EDS foram realizados apenas por Willems *et al.* (2002) e Willems (2006). Nesses trabalhos a análise com MEV e EDS demonstra a presença de Al, Si, P, S, K e Ca. Observa-se a presença de material silicoso amorfo, que corresponde principalmente a camadas ricas em sílica, constituída por opala A.

As camadas de deposição são caracterizadas por alternância de camadas de Si e camadas contendo Si, Al, P e K. Zonas ricas em Ca e S são notáveis e corresponde a anidrita ou cristais de gipso cobrindo os microalvéolos.

Em relação à gênese dos espeleotemas em rochas siliciclásticas, Wray (1997b, 1999) afirma que diferentemente dos espeleotemas em calcita, a precipitação de opala não ocorre por liberação de CO₂, e, portanto, ocorre apenas evaporação. Ou seja, a água concentrada em minerais precipita, evapora, deposita camadas de sílica amorfa e após a ocorrência de vários ciclos desses processos forma-se os depósitos químicos. O autor esclarece que a presença de quartzo, principalmente na base dos espeleotemas está associada à rocha matriz.

Destaca-se que em geral, os trabalhos qualitativos com uso de MEV e EDS apontam variedades de elementos químicos que compõem os espeleotemas originados em áreas com rochas siliciclásticas. Essas características também foram observadas na região SE de Diamantina e reforça a hipótese que a presença de poliminerais na rocha matriz contribui para a formação de cavidades e depósitos químicos.

Se considerar que a presença de depósitos químicos, apesar de não ser o processo único e exclusivo, é um registro de dissolução da rocha; pode-se considerar que a dissolução fez parte do processo de formação das cavidades da área de estudo em alguma fase de suas formações. Além disso, as imagens dos depósitos químicos indicam variações na concentração de mineral, e apontam prováveis oscilações nas condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento dos espeleotemas.

8. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO LITOLÓGICO DE INSERÇÃO DAS CAVIDADES

A análise do contexto litoestrutural de inserção das cavidades auxiliam a interpretação dos fatores que contribuem para o desenvolvimento destas feições. Todas as cavidades analisadas localizam-se nos domínios da Formação Sopa-Brumadinho (GRAF. 8.1 e FIG. 8.1). Entretanto, conforme verificado nos perfis geomorfológicos e litoestruturais, o ponto de amarração superficial das cavidades naturais subterrâneas indica que 72% (ou cinco⁴⁶) das cavidades encontram-se inseridas exclusivamente na Unidade Basal da Formação Sopa-Brumadinho, composta por quartzitos monomíticos.

A Gruta do Salitre está inserida também em áreas de quartzitos monomíticos da Formação Sopa-Brumadinho, mas apresenta contato com rochas metabásicas. A Gruta Extração, por sua vez, conforme mostra a FIG. 8.1, possui ponto de amarração superficial que indica contato entre quartzitos monomíticos e paraconglomerados, além de proximidade com corpos intrusivos de rochas metabásicas.

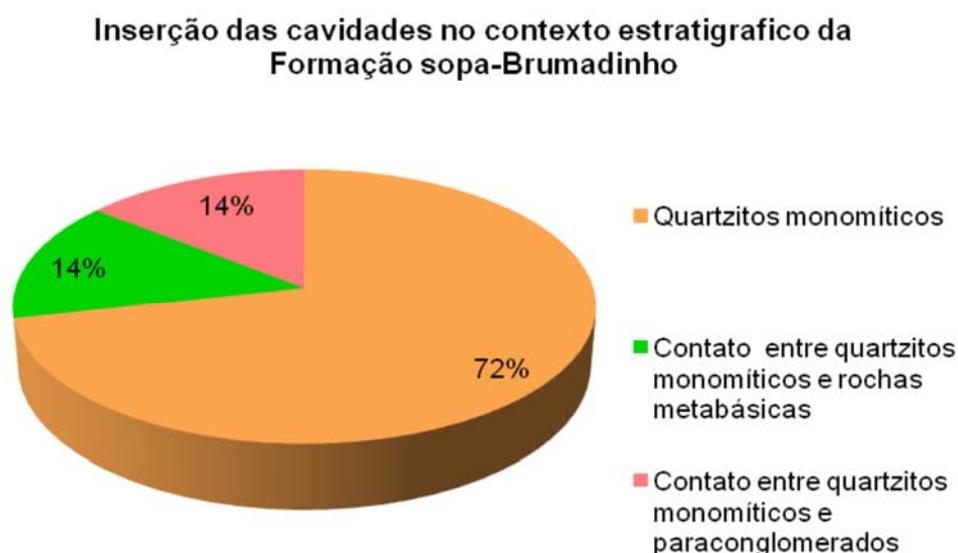


GRÁFICO 8.1 – Inserção das cavidades no contexto estratigráfico da Formação Sopa-Brumadinho

⁴⁶ Corresponde à Gruta Monte Cristo, Gruta da Ressurgência, Lapa Ribeirão do Inferno, Gruta Curralinho e Gruta das Sempre Vivas.

Perfis Geomorfológicos e Litoestruturais da Região SE de Diamantina/MG

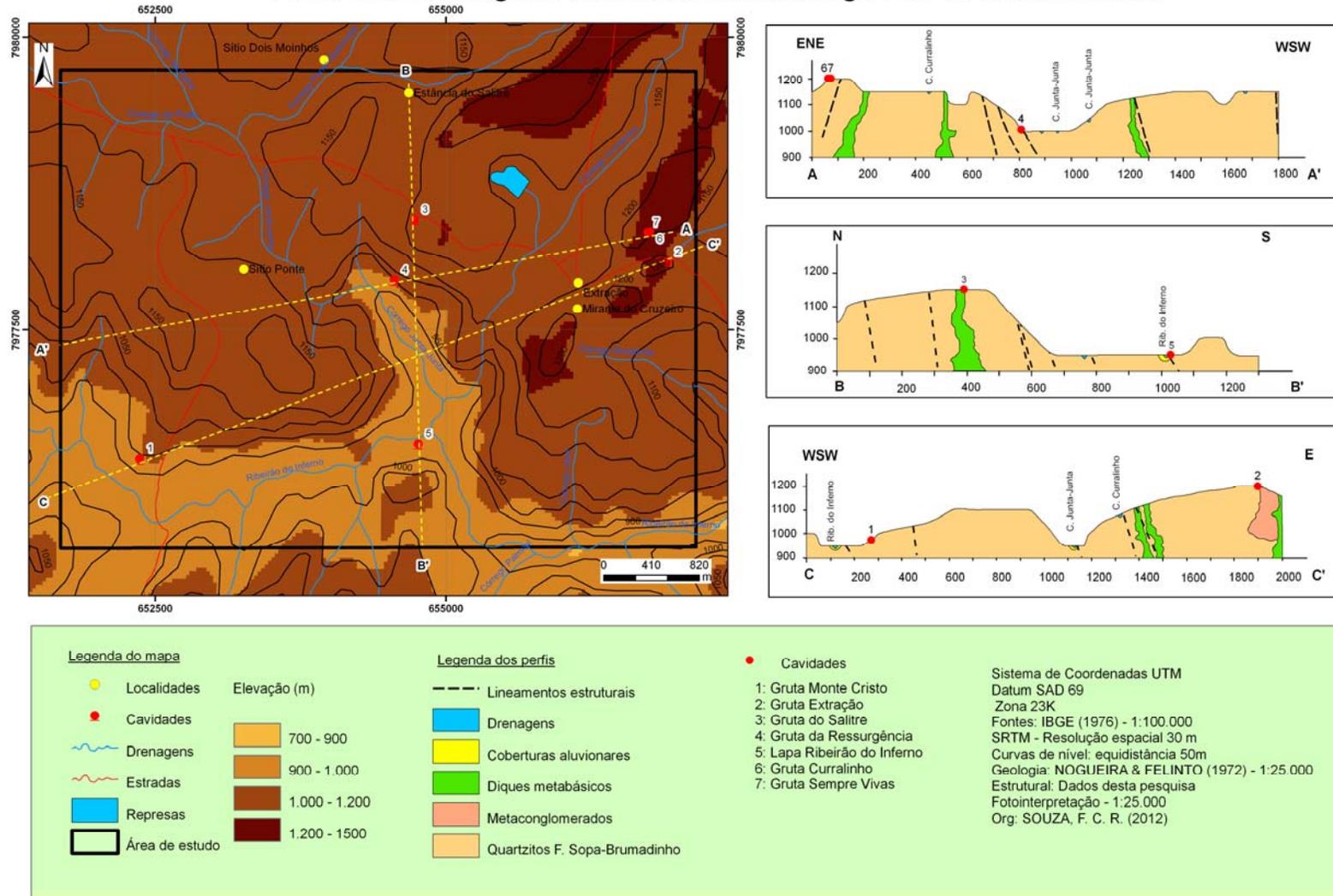


FIGURA 8.1 - Perfis geomorfológicos e litoestruturais da área de estudo

Deve-se considerar, entretanto, que na área subterrânea, o desenvolvimento das cavidades tende a extrapolar os limites litológicos, caso as condições ambientais favoreçam. A Gruta Extração, por exemplo, conforme verificação em campo possui ambiente subterrâneo desenvolvido, predominantemente, nos domínios de paraconglomerados e ortoconglomerados.

As características estratigráficas macroscópicas da Formação Sopa-Brumadinho podem ser observadas na FIG. 8.2. O contexto paleogeográfico local condicionou a formação, da base para o topo, de quartzitos monomíticos (unidade basal), ortoconglomerados de matriz sericítica, paraconglomerados de matriz quartzosa (unidade média) e rochas metabásicas (FIG. 8.2). A análise macroscópica demonstra a existência de quartzitos monomíticos com estratificações cruzadas (FIG. 8.2E1); registra-se a predominância de rochas de coloração acinzentada (FIG. 8.2E2), porém há, mesmo que em baixa concentração, a presença de rochas com óxido de ferro (FIG. 8.2E3). Destaca-se, também, a presença de mica distribuída de forma relativamente homogênea na amostra (FIG. 8.2E2) e apresenta foliação.

Os ortoconglomerados de matriz sericítica são caracterizados macroscopicamente pela presença de seixos e matações de tamanhos e composições diversificadas (FIG. 8.2D1 e D2). A matriz é arenosa, possui foliação, porém sua proporção de matriz é inferior à quantidade de clastos que compõem o arcabouço (FIG. 8.2D2). Entretanto, especificamente nesta unidade da Formação Sopa-Brumadinho não há ocorrências de cavidades, embora a Furna Mulatinho e Gruta Monte Cristo apresentem contato litológico com essa unidade. Os paraconglomerados de matriz quartzosa, por sua vez, são caracterizados pela presença de seixos de quartzo arredondados e subarredondados, com diâmetro médio de 10cm (FIG. 8.2C1). A matriz possui coloração cinzenta, com ocorrências de mica (FIG. 8.2C2) e apresenta foliação incipiente. Além disso, observa-se microfissuras em algumas amostras coletadas (FIG. 8.2).

Em relação à composição química e mineralógica das rochas, a descrição microscópica dos quartzitos monomíticos podem ser micáceos ou com lentes ferruginosas. Os quartzitos monomíticos micáceos são rochas bem selecionada e com alta maturidade textural. Além disso, essa rocha é composta por quartzo e mica, apresenta grãos arredondados com tamanhos que variam de 0,2 a 0,05mm e granulometria média a fina (FIG. 8.3 e QUADRO 8.1).

A lâmina petrográfica (FIG. 8.3B) mostra que o quartzito monomítico micáceo apresenta textura granoblástica, caracterizada pela presença de minerais granulares sem orientação preferencial. Além disso, registra a presença de grãos de quartzo geométricos e angulosos e também apresenta mica na lateral direita da lâmina. O quartzito monomítico com lentes de hematita é constituído essencialmente por quartzo, mica, óxido e hidróxido de ferro (QUADRO 8.1). A lâmina petrográfica desta rocha (FIG. 8.3A) registra a ocorrência de textura granoblástica, com contato reto entre os grãos. Os grãos são esféricos a arredondados, com tamanhos que variam de 0,2 a 0,05mm.

Conforme análise petrográfica microscópica o paraconglomerado apresenta arcabouço constituído por grânulos e seixos angulosos a arredondados, composto por quartzo e quartzito laminado. A matriz desta rocha é constituída por quartzo, feldspato e mica, e possui granulometria composta por areia média a grossa (QUADRO 8.1). A FIG. 8.3C registra a ocorrência de um grânulo de quartzo na parte central, que representa um dos elementos do arcabouço e a alta maturidade mineralógica e textural da matriz.

Os ortoconglomerados apresentam arcabouço constituído por grânulos, seixos e matacão subarredondados a arredondados composto por quartzo, quartzito, quartzito micáceo, quartzo fumê e metapelitos. A matriz desta rocha é constituída por quartzo e mica, e possui granulometria areia fina à média (QUADRO 8.1). A FIG. 8.3D demonstra a presença de grânulos de quartzito e quartzo imersos na matriz micácea, que apresenta baixa maturidade.

As rochas básicas, metabásicas ou ultrabásicas foram identificadas apenas alteradas na forma de solos. Mas Silva (2010) identificou-as e afirma que as ultrabásicas são rochas com baixa resistência mecânica e com o objetivo de verificar a possibilidade de que esta rocha pudesse conter o mineral talco, comum em metaultramáficas, o autor realizou-se uma determinação mineralógica qualitativa por Difração de Raio-X. Silva (2010) obteve como resultado a ausência deste mineral e, desta forma, concluiu que se trata de rocha metaígnea submetida a processo hidrotermal, que alterou a sua mineralogia original (sericitização).

QUADRO 8.1

Composições químicas, mineralógicas e texturais da litologia de inserção das cavidades

Composição Mineralógica	Composição Química	Textura	Cavidades associadas
Quartzito monomítico Quartzo: 95 a 98% Mica ⁴⁷ : 1 a 2% Óxido e hidróxido de ferro: 3%	Si O Fe H Al F K, Na ou Ca Mg ou Li	Areia fina à média 0,05 a 0,2mm	<ul style="list-style-type: none"> • Gruta do Salitre • Gruta Monte Cristo • Lapa Ribeirão do Inferno • Gruta da Ressurgência • Gruta Curralinho • Gruta das Sempre Vivas
Ortoconglomerado Quartzo: 95 a 64% Mica: 36 a 5%	Si O Al F K, Na ou Ca Mg, Fe ou Li	Arcabouço: Grânulos, seixos e matacão Matriz: areia fina à média 0,05 a 0,2mm	<ul style="list-style-type: none"> • Gruta Monte Cristo • Gruta Extração
Paraconglomerado Quartzo: 90% Feldspato: 8% Mica: 2%	Si O Al K, Na ou Ca ⁴⁸	Arcabouço: Grânulos e seixos Matriz: areia média a grossa 0,3 a 2mm	<ul style="list-style-type: none"> • Gruta Extração

Obs: A composição química foi informada com base nos tipos de minerais identificados e conforme Shelley (1975) e Klein e Hurlbut Jr (1999).

⁴⁷ Conforme Klein e Hurlbut Jr (1999), a fórmula geral das micas é $X_2Y_4Z_8O_{20}(OH,F)_4$, onde:

X: K (potássio), Na (sódio), Ca (cálcio);

Y: Al (alumínio), Mg (magnésio), Fe (ferro), Li (lítio)

Z: Si (silício), Al (alumínio)

⁴⁸ A composição química está associada ao tipo de feldspato existente na amostra e essa classificação não faz parte do escopo deste trabalho.

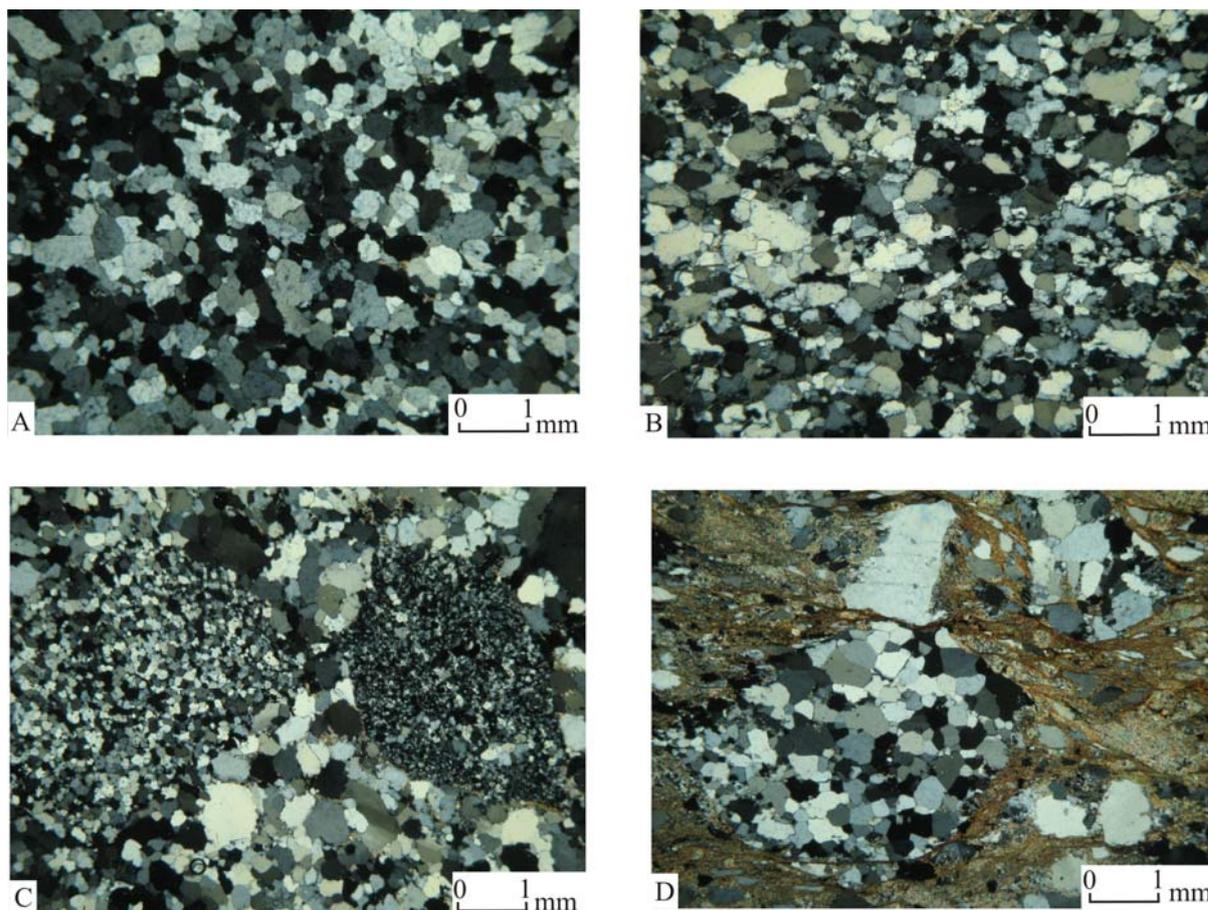


FIGURA 8.3 - Caracterização microscópica das rochas da área de estudo. Quartzito monomítico (A); Quartzito micáceo (B); Paraconglomerado (C); Ortoconglomerado (D). Nicóis cruzados. Aumento 2,5x.

8.1. Discussões

A relação entre a litologia siliciclástica e o desenvolvimento das cavidades pode ser discutida a partir de três aspectos: a) composição mineralógica da rocha; b) porosidade primária; c) granulometria da rocha. Em termos de composição mineralógica, as rochas siliciclásticas podem solubilizar e desenvolver paisagens ou feições cársticas de escala pequena e intermediária (MAINGUET, 1972 apud FORD; WILLIAMS, 2007), ocasionando o alcance das formas e o comportamento hidrogeológico limitados (FORD; WILLIAMS, 2007).

A análise macroscópica das rochas registra a ocorrência de minerais primários como quartzo, mica e indicativos de óxidos e hidróxidos de ferro, o que indica a polimineralização litológica no contexto de inserção das feições cársticas. A análise petrográfica microscópica confirma essa afirmação, acrescenta a ocorrência de feldspato e indica as proporções dos principais minerais. Desta forma, percebe-se que em todas as fácies litológicas da Formação Sopa Brumadinho há o predomínio de quartzo, que em média possui concentração superior a

90%, e é seguido da presença dos outros minerais. Assim, embora a presença de minerais não silicosos apresente concentração entre 1 e 36%, portanto inferior ao percentual de sílica, isso é considerado importante para favorecer a quebra das ligações químicas e dissolução da rocha.

A composição química das rochas da área pesquisada, em termos quantitativos, foram realizados por Silva (2010) através da Espectrometria de Inspersão por Plasma ou *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) para clastos ferruginosos dos ortoconglomerados, e por Rodet *et al.* (2009) cujo método não foi especificado pelos autores. O GRAF. 8.2 demonstra a média das composições geoquímicas de elementos maiores em cinco amostras de quartzitos da Formação Sopa Brumadinho na região de Extração, conforme os estudos de Rodet *et al.* (2009). Essas amostras incluem uma amostra de quartzito monomítico da região de Diamantina e quatro amostras da Gruta do Salitre, sendo que uma delas é impregnada de manganês (Mn). O GRAF. 8.3, por sua vez, registra a média das análises geoquímicas de elementos maiores em seis clastos de formações ferríferas de ortoconglomerados da Formação Sopa Brumadinho na região de Extração, conforme investigado por Silva (2010).

Esses dados possibilitam ratificar que os quartzitos monomíticos, litologia predominante na área de estudo, apresentam composição geoquímica composta predominantemente por SiO_2 , cujos valores oscilam de 98,65 a 86,75% (RODET *et al.*, 2009) e a média equivale a 95,38% (GRAF. 8.2). Os clastos de formação ferruginosa dos ortoconglomerados também apresentam composições geoquímicas formadas predominantemente por SiO_2 (88,94 a 47,16%) e Fe_2O_3 (51,55 a 10,23), devido ao tipo de clasto (SILVA, 2010). A concentração média destes minerais são, respectivamente, 63,05% e 35,71% (GRAF. 8.3).

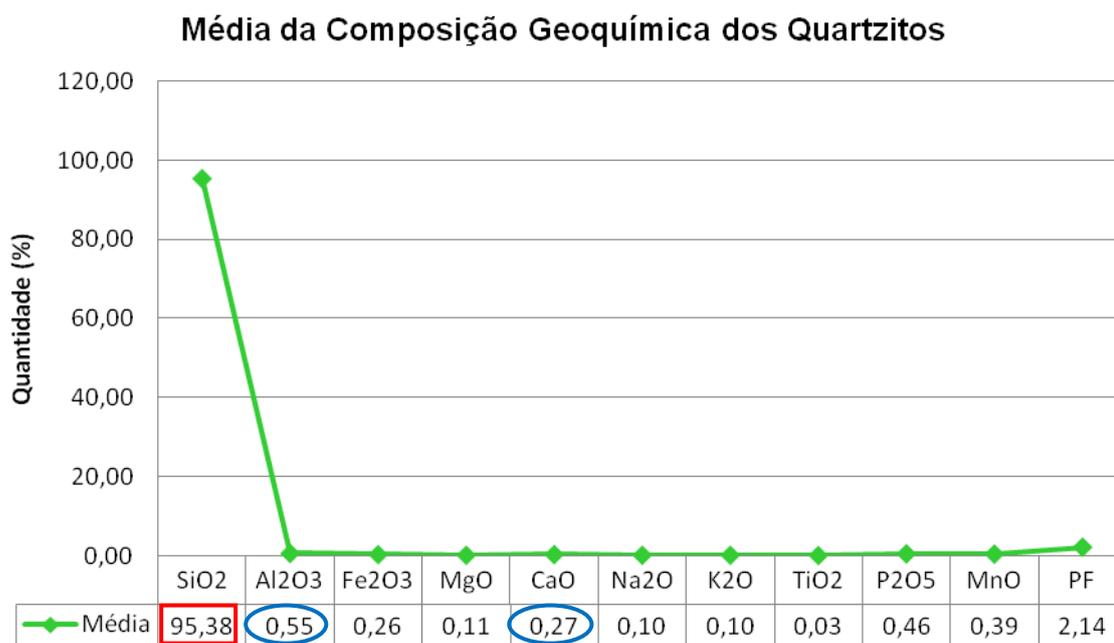


GRÁFICO 8.2 - Média da composição geoquímica de elementos maiores em quartzitos da Formação Sopa Brumadinho na área de estudo.

Fonte: Rodet *et al.* (2009)

Org: Souza, F. C. R. (2013)

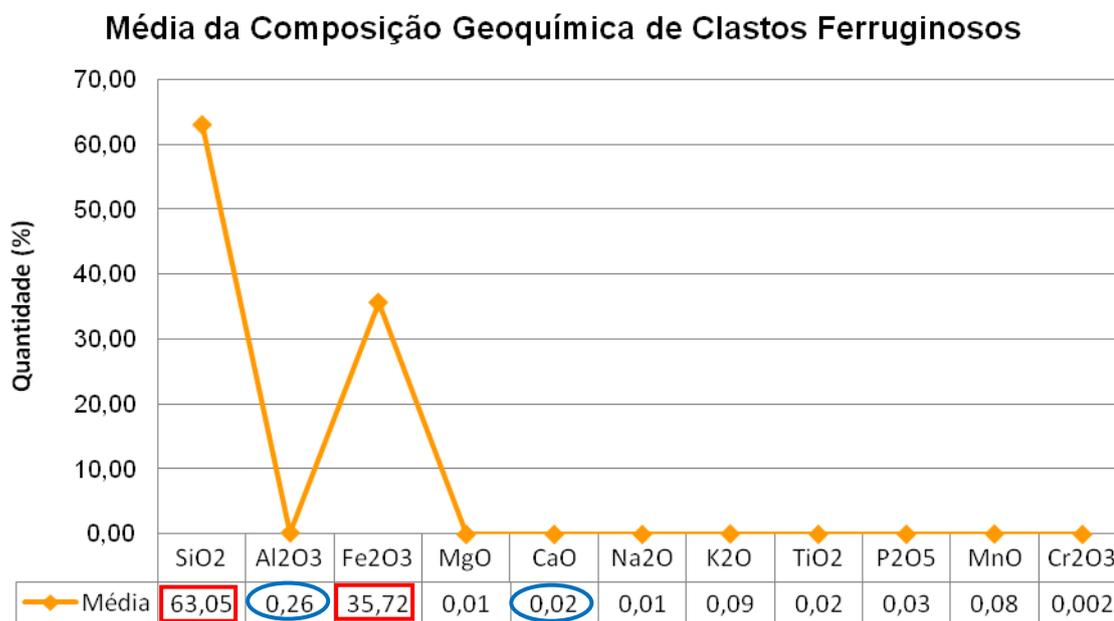


GRÁFICO 8.3 - Média da composição geoquímica de elementos maiores em clastos de formação ferríferas de ortoconglomerados da Formação Sopa Brumadinho na área de estudo.

Fonte: Silva (2010)

Org: Souza, F. C. R. (2013)

Os dados apresentados por Rodet *et al.* (2009) e Silva (2010) confirmam os resultados obtidos neste estudo e demonstra que em ambas as fácies da Formação Sopa Brumadinho

(quartzitos ou ortoconglomerados) há, mesmo que em baixas concentrações, minerais que são considerados como altamente solúveis como o CaO (0,27 e 0,02% para quartzitos e ortoconglomerados, respectivamente). Além disso, destaca-se que a concentração de Al_2O_3 possui média de 0,55% nos quartzitos monomíticos e 0,26% nos clastos de formação ferrífera dos ortoconglomerados (GRAF. 8.2. e 8.3) e, neste caso, pode ser considerada baixa se comparada à concentração de SiO_2 . Registra-se que ao serem alterados, esses minerais tendem a se dissociarem [(O – Si – O) e (O – Al – O – Al – O)] e buscam o equilíbrio, que pode ocorrer através de: a) formação de aluminossilicatos ou b) serem dissolvidos e lixiviados. Levando em consideração que a proporção de SiO_2 nos quartzitos monomíticos é 173,42 vezes⁴⁹ superior à concentração de Al_2O_3 , há probabilidade de formação de poucos aluminossilicatos e, caso haja fluxo hídrico, o Si dissolvido é lixiviado.

Esse fator corresponde ao outro aspecto que pode associar ao desenvolvimento das feições cársticas na área estudada: presença de poliminerais. Assim, a presença de poliminerais, especialmente CaO, MgO, K_2O , pode facilitar o processo de dissolução de rochas siliciclásticas. Porém, se a proporção dos minerais não silicatados for Al_2O_3 , inibe o processo de formação destas feições, visto que conforme Ford e Williams (2007) as formas superficiais e subterrâneas ficam cheias ou bloqueadas por grãos insolúveis de aluminossilicatos. Neste contexto, Ford e Williams (2007) afirma que a concentração predominante de sílica ou alta pureza mineralógica corresponde a um fator favorável ao desenvolvimento de feições cársticas, uma vez que restringe a formação de aluminossilicatos.

Outro fator litológico que possui relação com a dissolução da rocha é a porosidade primária. Neste contexto, ao contrário dos arenitos que são rocha sedimentares siliciclásticas porosas, os quartzitos da área de estudo são siliciclásticas com baixo grau de metamorfismo (UHLEIN, 1991). Assim, o metamorfismo, mesmo que de baixo grau, inibe o processo de dissolução, uma vez que reduz a porosidade primária da rocha. As lâminas petrográficas confirmam que o espaço intergranular é pequeno e, portanto, restringe os locais de contato da água, o agente de dissolução.

Em relação à composição textural, percebe-se que há comportamentos diferentes em cada tipo de fácies litológica. Os quartzitos monomíticos micáceos, conforme verificado na análise petrográfica, apresentam alta maturidade textural, granulometria entre 0,4 a 0,1mm, sendo composta predominantemente por areia fina à média. Os conglomerados (orto e para) são compostos por arcabouço e matriz. Sendo que nos paraconglomerados a proporção de

⁴⁹ Esse valor foi obtido a partir da divisão da concentração de SiO_2 pela taxa de Al_2O_3 .

matriz é superior ao arcabouço. Essa matriz apresenta granulometria de areia média a grossa e o arcabouço é composto por grânulos e seixos arredondados ou subarredondados. Já os ortoconglomerados são caracterizados por apresentar contato entre os grânulos, seixos e matações que compõem o arcabouço; e este, por sua vez, possui proporção superior à matriz, que apresenta granulometria entre 0,4 a 0,1mm (areia fina à média).

Considera-se que quanto maior a heterogeneidade granulométrica nas rochas, maior tende a ser a superfície de contato da água, o que favorece a dissolução (FORD; WILLIAMS, 2007). Neste caso, a dissolução tende a ocorrer de forma mais rápida nos conglomerados em relação aos quartzitos monomíticos.

Em relação à proporção de feições cársticas associadas às fácies litológicas da Formação Sopa Brumadinho, nota-se que a maioria das cavidades ocorre no contexto de quartzito monomítico micáceos, embora haja contato litológico em algumas cavidades. Quanto à contribuição dos corpos intrusivos de rochas metabásicas não é possível realizar nenhuma relação mineralógica visto que não foi encontrada amostra litológica para realizar esta análise.

Assim, a maioria das cavidades desenvolvidas apenas em quartzito monomítico apresenta dimensões morfométricas entre 7 e 200m, ou seja, possui o maior número amostral de cavidades, porém com as menores dimensões morfométricas. Quando o desenvolvimento da cavidade atinge o contato com os conglomerados da Formação Sopa Brumadinho, as cavidades tendem a apresentar maior projeção horizontal (216 a 593,5m). Esse fator pode está associado ao contexto granulométrico e mineralógico dos conglomerados, afinal, essas rochas são formadas por poliminerais, como quartzo (95 a 64%), mica (36 a 5%) e feldspato (8%), possui maior concentração de minerais não silicosos e menor teor de Al_2O_3 se comparado ao quartzito monomítico micáceo. A granulometria dos conglomerados apresenta maior porosidade que os quartzitos monomíticos e, portanto, facilita a percolação hídrica.

Fabri (2011) afirma que um conjunto de fatores parece ser essencial para o processo de carstificação das cavidades em quartzitos da região de Itambé do Mato Dentro. Entre esses fatores destaca-se a litologia, composta por quartzitos com tendência ao deslocamento, com presença de sericita orientada segundo o plano de foliação da rocha e apresenta quartzos com granulometria média a fina. A autora acrescenta que a presença de mica contribui para o processo de dissolução do quartzito.

Silva (2004) também afirma que a presença de outros minerais na composição do quartzito contribui para a formação de cavidades na Serra do Ibitipoca. Pois apesar de se registrar teores de quartzo com até 98% de concentração, há volumes de mica e feldspatos.

Com isso, Corrêa Neto *et al.* (1993, 1997) e Corrêa Neto (1997) acreditam que as cavidades na Serra do Ibitipoca seriam formadas a partir da lixiviação de sódio (Na) e potássio (K) provenientes das micas e feldspatos, junto também com a dissolução da sílica.

Em resumo, constata-se que a presença de rochas com composição polimineralógica e politextural favorece o desenvolvimento de feições cársticas na área investigada. Entretanto, a composição litológica demonstra não ser o principal fator responsável pela formação de feições cársticas na área de estudo, visto que em geral, as feições cársticas não podem ser classificadas conforme o tipo litológico e os quartzitos da área de estudo apresentam baixo grau de metamorfismo, que inibe o processo de dissolução da rocha. Além disso, apenas o fator litologia não justifica o desenvolvimento de feições cársticas na área. Os processos atuantes e as feições desenvolvidas devem ser associados também ao contexto estrutural e geomorfológico local.

9. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO ESTRUTURAL DE INSERÇÃO DAS CAVIDADES

O contexto estrutural de inserção das cavidades foi caracterizado na área superficial e no interior das cavidades. As direções dos lineamentos estruturais⁵⁰ superficiais realizados por meio de fotografias aéreas (FIG. 9.1), imagens de satélite *RapidEye* e SRTM (FIG. 9.2) foram organizadas segundo as orientações N-S; NE-SW; NW-SE; NNW-SSE e E-W (FIG. 9.1) e interpretadas também conforme o azimute 0, 45, 90, 270 e 315, com a finalidade de analisar os principais ângulos de iluminação azimutal (FIG. 9.2). Destaca-se a predominância de lineamentos superficiais orientados segundo o trend NE-SW e NNE-SSW (FIG. 9.1 e 9.2).

As feições hidrográficas respondem às características litológicas, estruturais e geomorfológicas da área pesquisada. O condicionamento estrutural pode ser observado ao destacar a presença de curvas anômalas em segmentos dos cursos fluviais superficiais, como registra a FIG. 9.3. Ressalta-se que a presença de curvas anômalas é recorrente, predominantemente, no Ribeirão do Inferno e Córrego Junta-Junta, sendo que algumas cavidades encontram-se influenciadas localmente por essas drenagens. A drenagem intermitente da Lapa Ribeirão do Inferno drena diretamente para o ribeirão homônimo e localiza-se nas margens desta drenagem. Na Gruta da Ressurgência a drenagem interna emerge em ressurgência e flui para o Córrego Junta-Junta. A Gruta do Salitre requer estudo aprofundado sobre o comportamento hidrológico e uso de técnicas específicas para estes fins, mas pode está associada ao Córrego Junta-Junta. Neste sentido, as referidas drenagens funcionam como níveis de bases locais e a mudança de direção ou na sua dinâmica podem afetar diretamente o comportamento dos córregos que drenam as cavidades; e isso implica em alterações no processo de desenvolvimento das cavidades.

⁵⁰ Neste estudo o termo lineamentos estruturais é utilizado para se referir às feições estruturais em geral, incluindo falhas, fraturas e juntas.

Lineamentos Estruturais na Área de Estudo

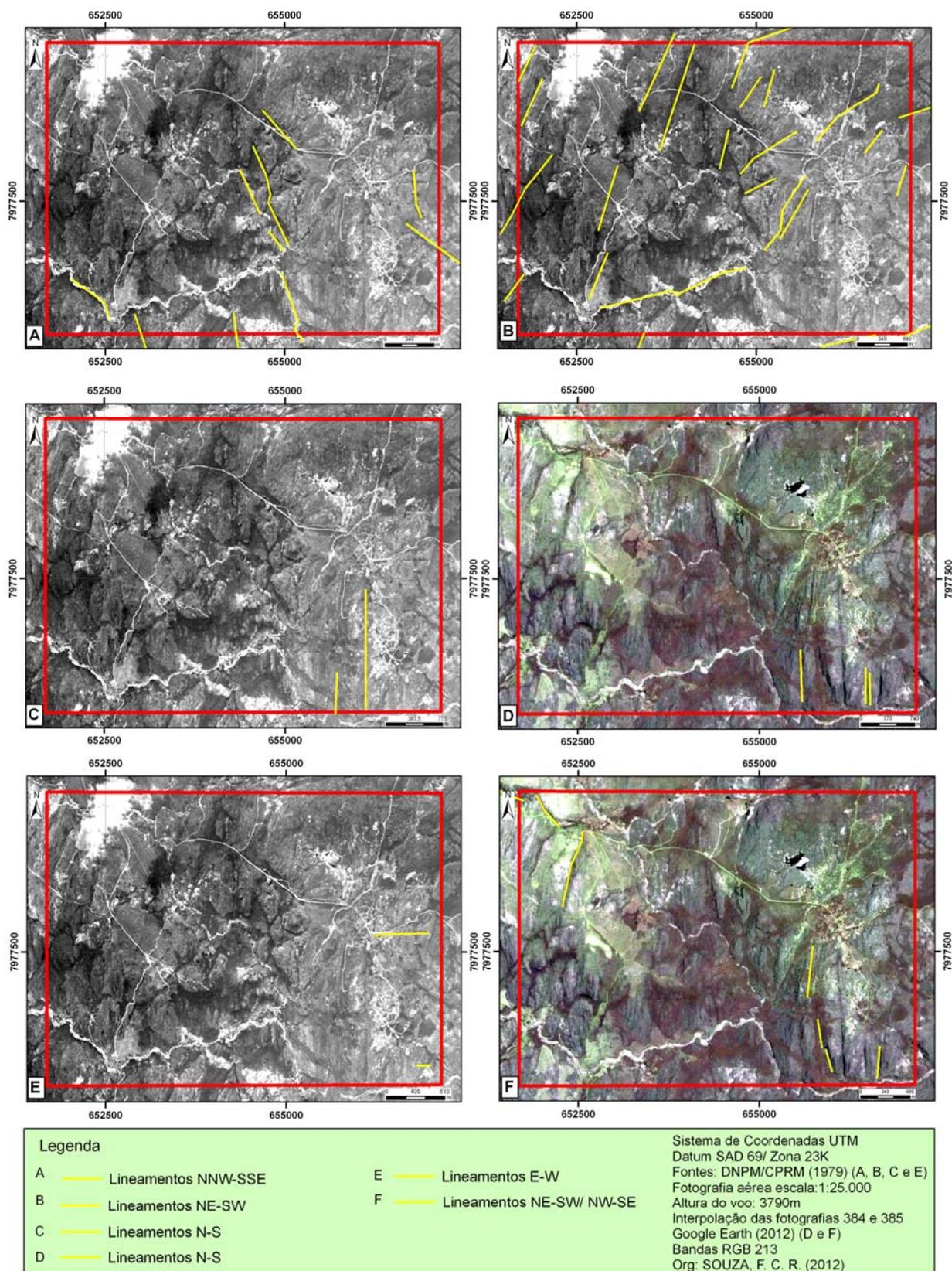


FIGURA 9.1 - Lineamentos estruturais na área de estudo

Lineamentos Estruturais em Superfície na Área de Estudo

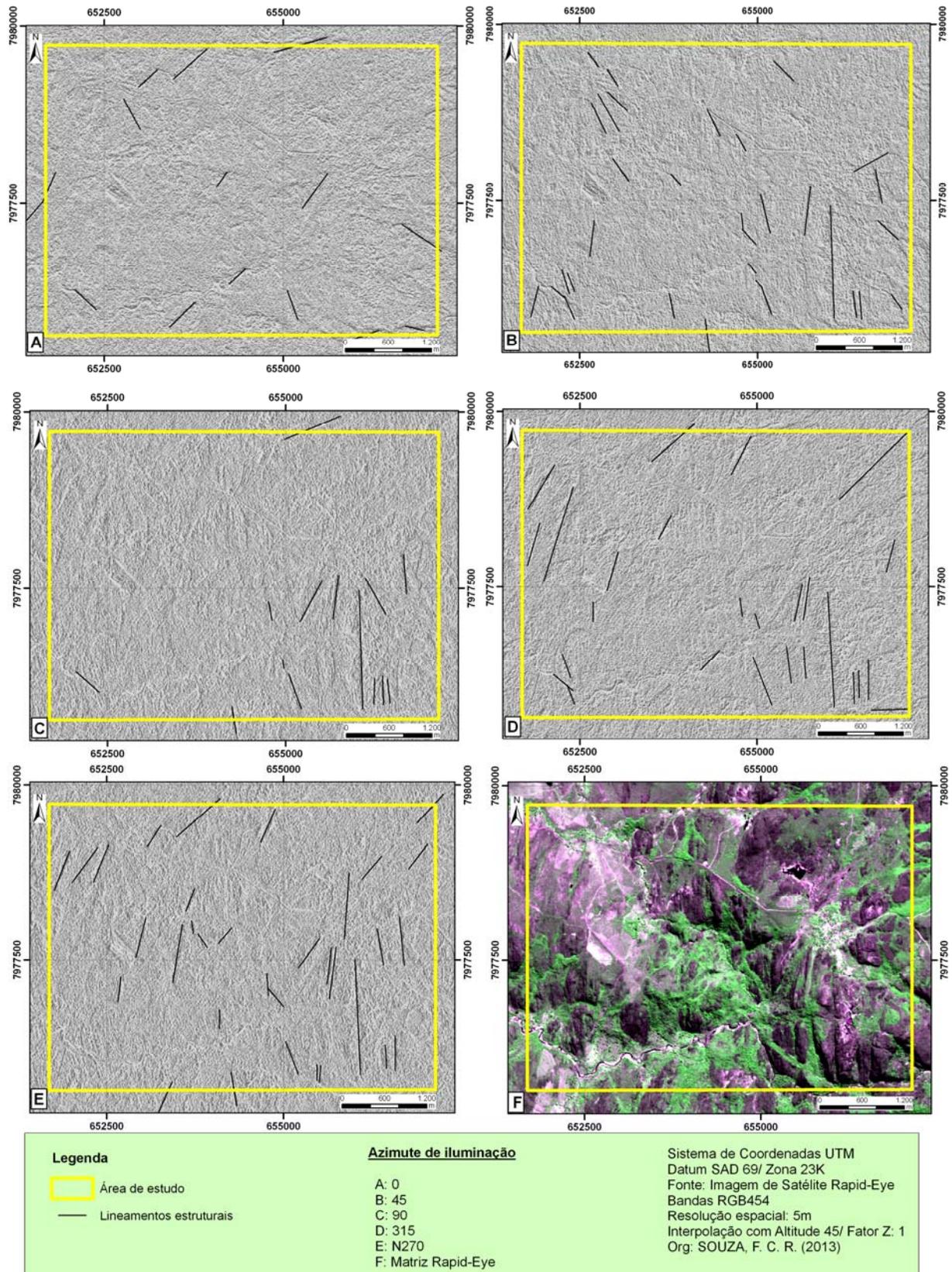


FIGURA 9.2 - Lineamentos estruturais na área de estudo

Anomalias nos Cursos Fluviais Superficiais da Área de Estudo

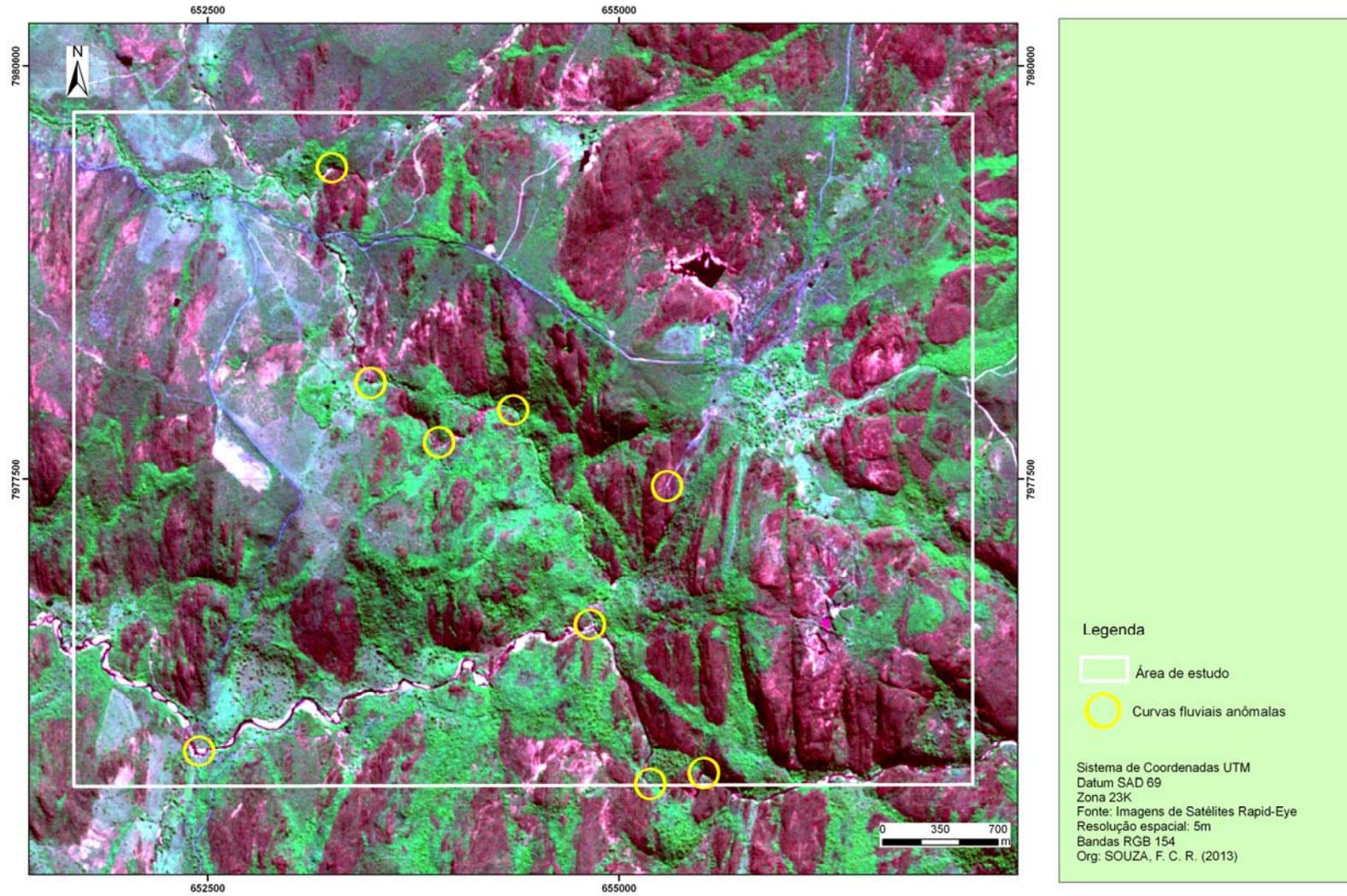


FIGURA 9.3 - Curvas anômalas dos segmentos fluviais superficiais na região SE de Diamantina/MG

O direcionamento dos segmentos fluviais pode está associado ao direcionamento estrutural e ao gradiente do relevo. A identificação do direcionamento dos segmentos fluviais foi organizada segundo as direções N, S, NE, NW e SW (FIG. 9.4). Consta-se que o fluxo hídrico escoia predominantemente nos sentidos NE, SW, N e S. Isso confirma que as direções dos segmentos fluviais são concordantes com os *trends* preferenciais dos lineamentos estruturais superficiais da área de estudo (NE-SW) e também estão orientados conforme a direção geral da SdEM (N-S). Assim, embora se admita que a dinâmica fluvial subterrânea ou hidrogeológica tenha comportamento específico, deve-se considerar que as cavidades que possuem drenagens subterrâneas diretamente associadas às drenagens superficiais também são influenciadas morfogeneticamente pelo fluxo superficial.

A FIG. 9.5 sintetiza os dados de direção dos lineamentos estruturais interpretados neste estudo. Ressalta-se que a moda geral dos lineamentos corresponde a NE-SW e NNE-SSW, conforme verificado a partir da análise de 68 medidas estruturais. Essas direções são concordantes com os estudos de mapeamento geológico realizados por Nogueira e Felinto (1982); Viegas (2010) e Silva (2010). A direção preferencial dos acamamentos equivale a NE-SW, atitude N10-20E (FIG. 9.5).

Os planos de fratura foram verificados, medidos e mapeados no interior das cavidades. Na Gruta da Ressurgência (FIG. 9.6) registra-se a presença de planos de fratura com direção preferencial N20-30E. O mapeamento dos planos de fratura levantados demonstra que a direção dos lineamentos é concordante com a direção da cavidade. Entretanto, registra-se que em termos morfológicos, esses lineamentos estruturais não correspondem aos únicos fatores que condicionaram morfológicamente o desenvolvimento desta cavidade. Afinal, os cortes transversais permitem observar que a cavidade é predominantemente baixa e larga. Ou seja, com exceção dos locais com clarabóia e ressurgência o desenvolvimento da cavidade é predominantemente lateral e horizontal.

A Gruta Currealinho (FIG. 9.7) apresenta os planos de fratura com direção preferencial N40-50E. O mapeamento das feições estruturais demonstra que alguns condutos possuem planos de fratura com direções concordantes com a direção de desenvolvimento da cavidade, porém não é regra. Morfológicamente, registra-se que os planos de fratura não demonstram ser o único fator de desenvolvimento da cavidade, uma vez que ela apresenta comportamento planimétrico irregular e com alguns condutos retilíneos. Além disso, os cortes transversais registram que a cavidade possui desenvolvimento predominantemente lateral e horizontalizado.

Direções dos Segmentos Fluviais Superficiais na Área de Estudo

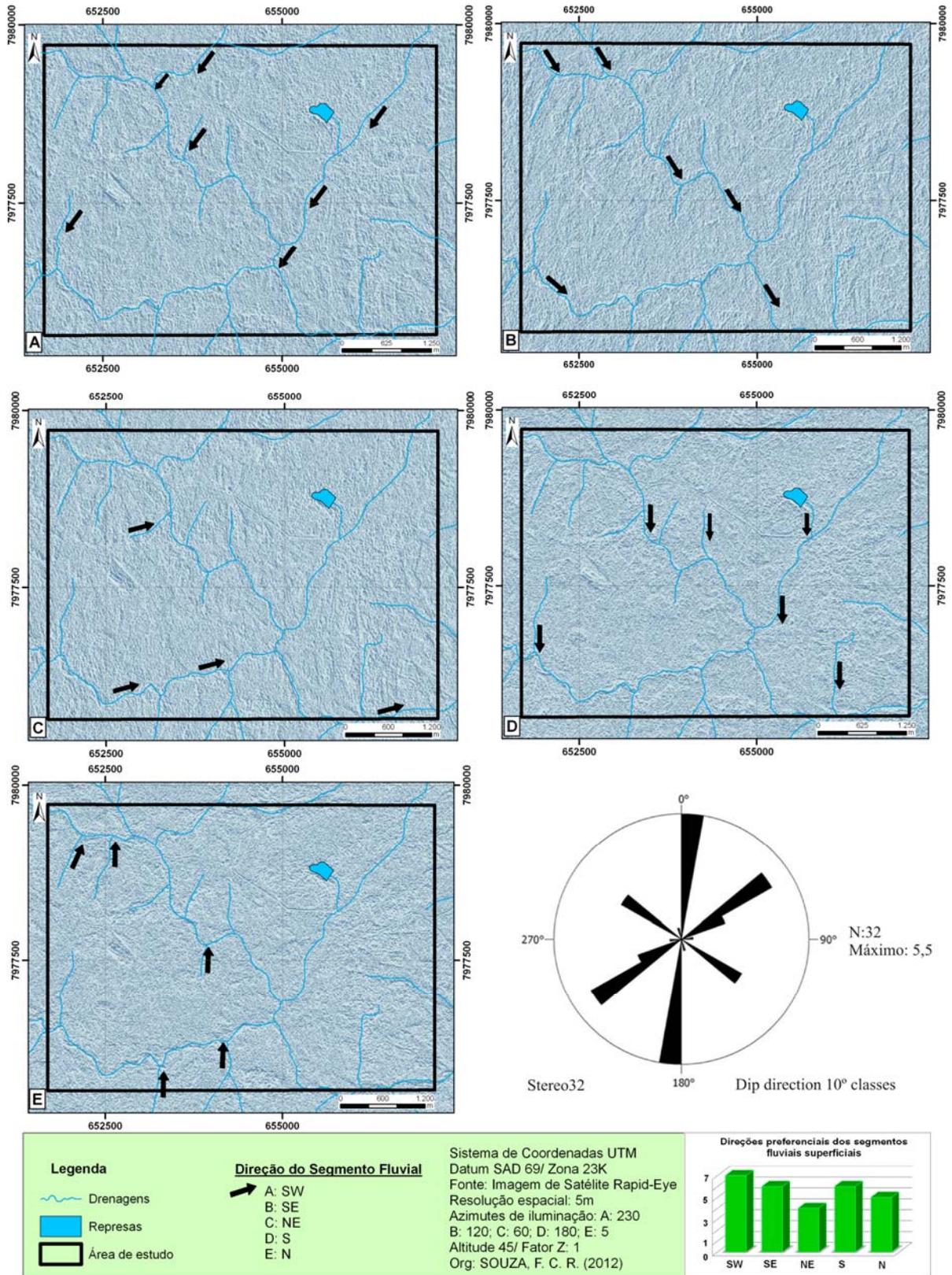


FIGURA 9.4 - Direções dos segmentos fluviais superficiais na área de estudo

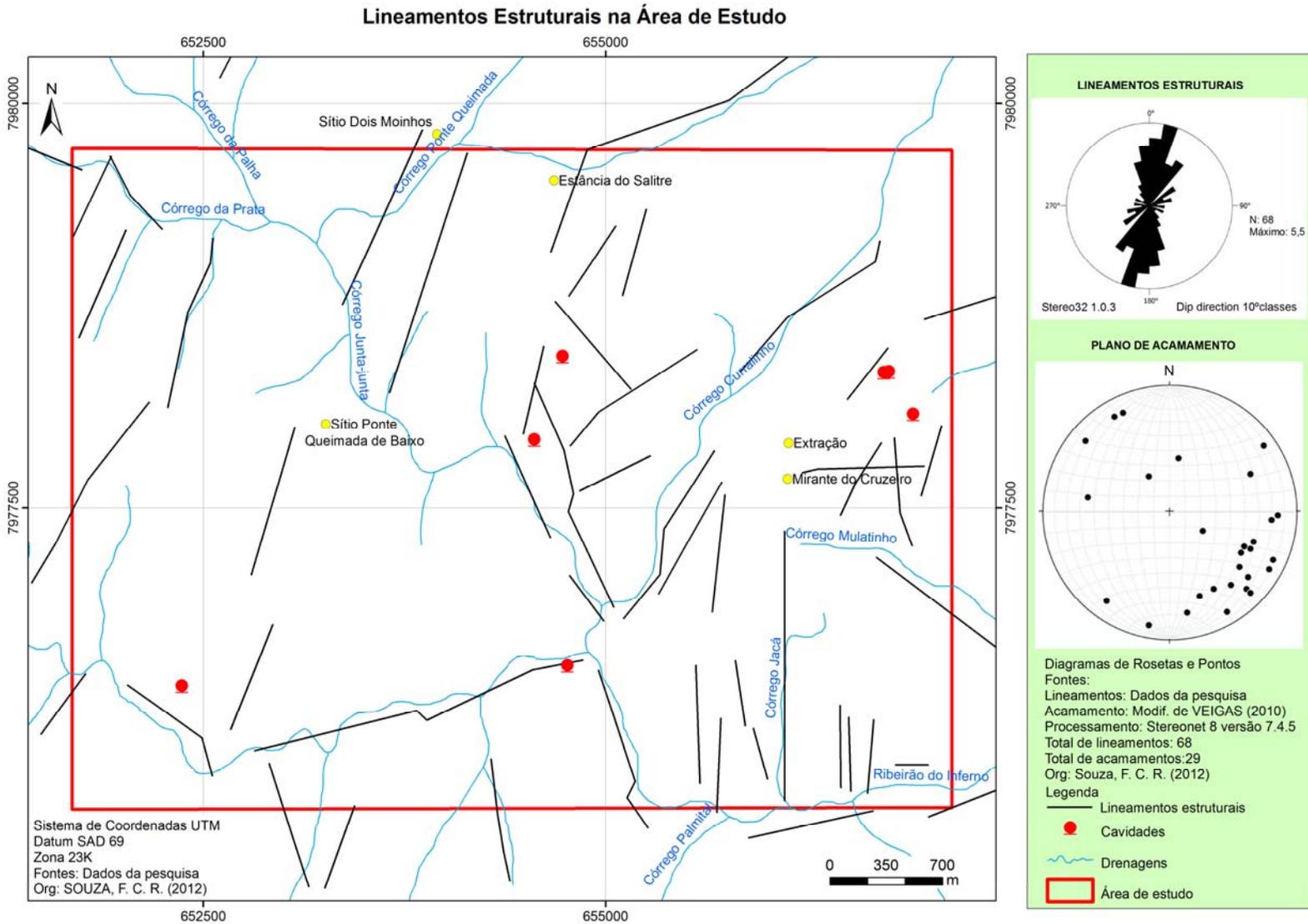


FIGURA 9.5 - Lineamentos estruturais na região SE de Diamantina

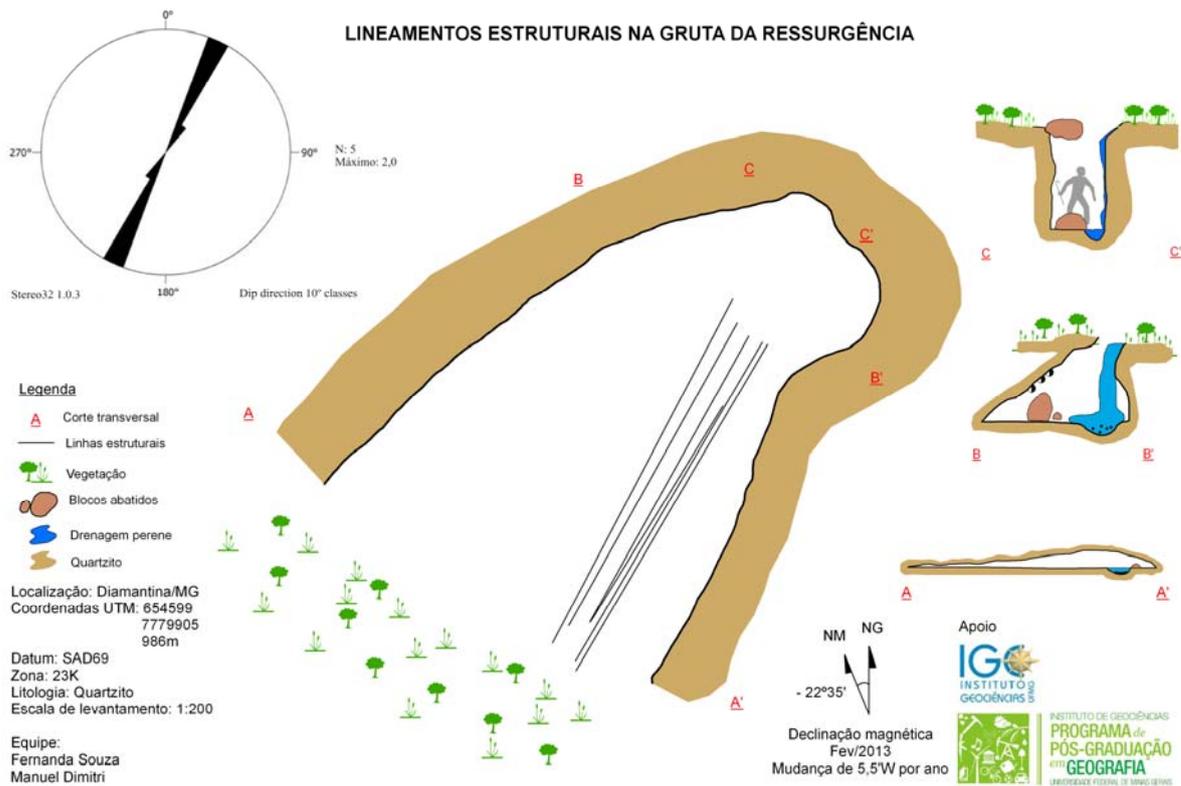


FIGURA 9.6 – Lineamentos estruturais na Gruta da Ressurgência

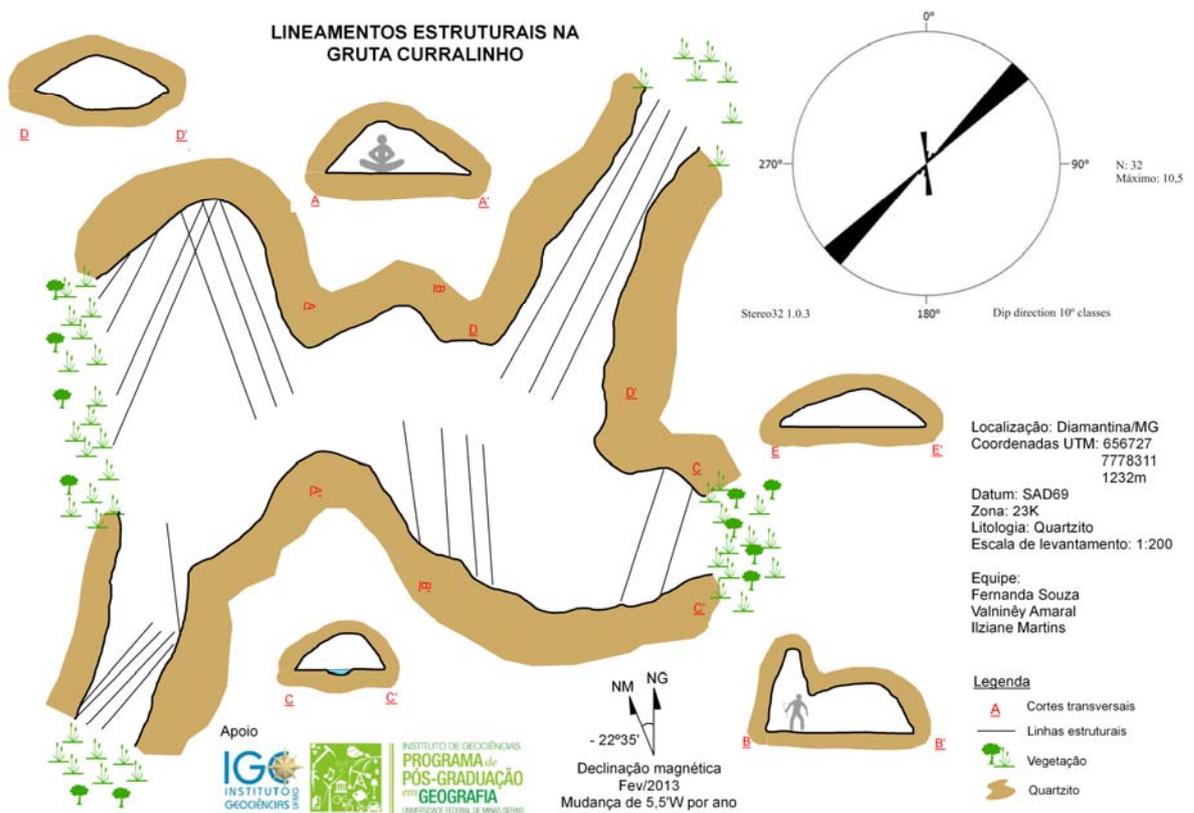


FIGURA 9.7 – Lineamentos estruturais na Gruta Curralinho

A Gruta Monte Cristo (FIG. 9.8) apresenta os planos de fratura com direções preferenciais N10-20E. A espacialização dessas feições estruturais demonstra que algumas fraturas são concordantes com o desenvolvimento de alguns condutos. Morfologicamente percebe-se que os planos de fratura não são os condicionantes exclusivos de desenvolvimento desta cavidade, uma vez que ela possui características horizontalizadas e suavemente inclinadas. Devido ao reduzido desenvolvimento verticalizado, constata-se que os planos de fraturas não são os únicos fatores que influenciaram no desenvolvimento morfológico da Gruta Monte Cristo.

A Gruta Extração, por sua vez, apresenta planos de fratura com direção preferencial N10-20E (FIG. 9.9). A distribuição espacial dessas feições estruturais demonstra que algumas são concordantes com a direção dos condutos, porém esta ocorrência não é a exclusiva. Em termos planimétricos, observa-se que a cavidade apresenta desenvolvimento predominantemente lateral e inclinado. Neste sentido, observa-se que os planos de fratura influenciam, mas não são os únicos fatores que condicionam o desenvolvimento morfológico da Gruta Extração.

A Gruta do Salitre (FIG. 9.10) é composta por lineamentos estruturais com direção preferencial N30-40E. A distribuição espacial dos planos de fratura registra que estas feições podem ser concordantes com a direção de desenvolvimento dos condutos. A morfologia da cavidade, com desenvolvimento predominantemente horizontalizado, evidencia que os lineamentos estruturais tiveram participação no desenvolvimento da cavidade, porém não corresponde ao único fator morfológico de formação desta cavidade.

A Gruta das Sempre Vivas (FIG. 9.11) possui planos de fratura com direção preferencial N40-50E. A direção dessas feições estruturais nem sempre é concordante com o direcionamento preferencial de desenvolvimento da cavidade. As características morfológicas (larga, baixa, suavemente inclinada) dos condutos demonstram que a Gruta das Sempre Vivas não é condicionada essencialmente por planos de fratura, embora sua participação seja importante nesse processo.

A Lapa Ribeirão do Inferno (FIG. 9.12) possui planos de fratura com desenvolvimento preferencial N20-30E. A distribuição espacial das feições estruturais registra que alguns planos de fratura são concordantes com a direção preferencial da cavidade e outros são discordantes. A morfologia da cavidade demonstra que o seu desenvolvimento é predominantemente horizontalizado, suavemente inclinado e com espraiamento lateral em alguns locais. Neste sentido, percebe-se que os planos de fratura não correspondem ao único fator de desenvolvimento morfológico da cavidade. Os cortes transversais na Gruta das

Sempre Vivas e na Lapa Ribeirão do Inferno reforçam esta afirmativa (FIG. 9.11 e 9.12). Afinal, a presença de condutos com formato oval não indicam condicionamento estrutural no desenvolvimento morfológico. Esta característica sugere que os fatores hidrológicos favoreceram o desenvolvimento destes condutos.

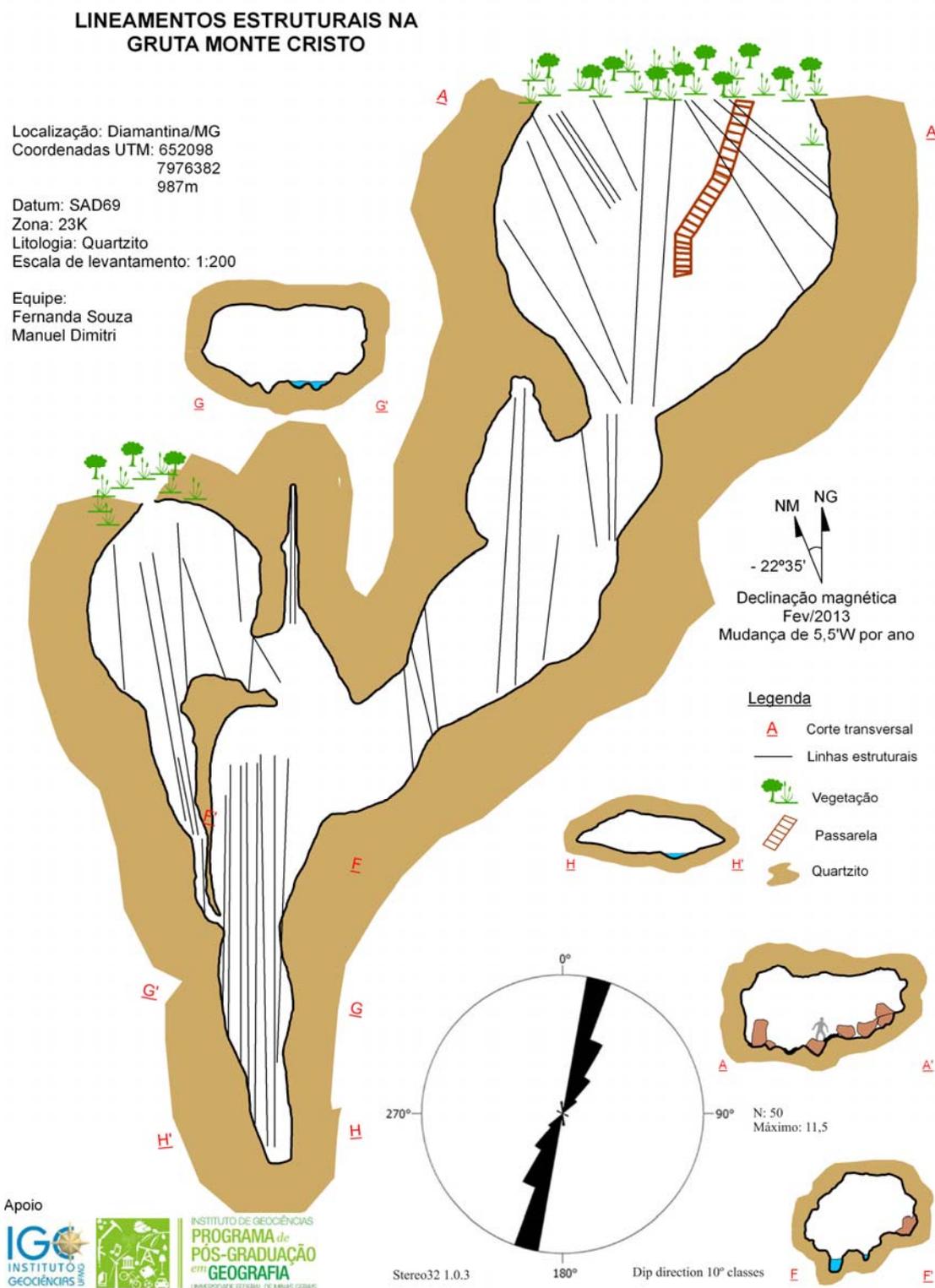


FIGURA 9.8 – Lineamentos estruturais na Gruta Monte Cristo

LINEAMENTOS ESTRUTURAIS NA GRUTA EXTRAÇÃO

Localização: Diamantina/MG
 Coordenadas UTM: 656889
 7978001
 1232m

Datum: SAD69
 Zona: 23K
 Litologia: Quartzito
 Escala de levantamento: 1:500

Equipe:
 Diego Ferreira
 Fernanda Souza

Legenda

- Cortes transversais
- Linhas estruturais
- Vegetação
- Quartzito
- Limite do conduto
- Nível Superior
- 1º Nível Inferior
- 2º Nível Inferior
- 3º Nível Inferior

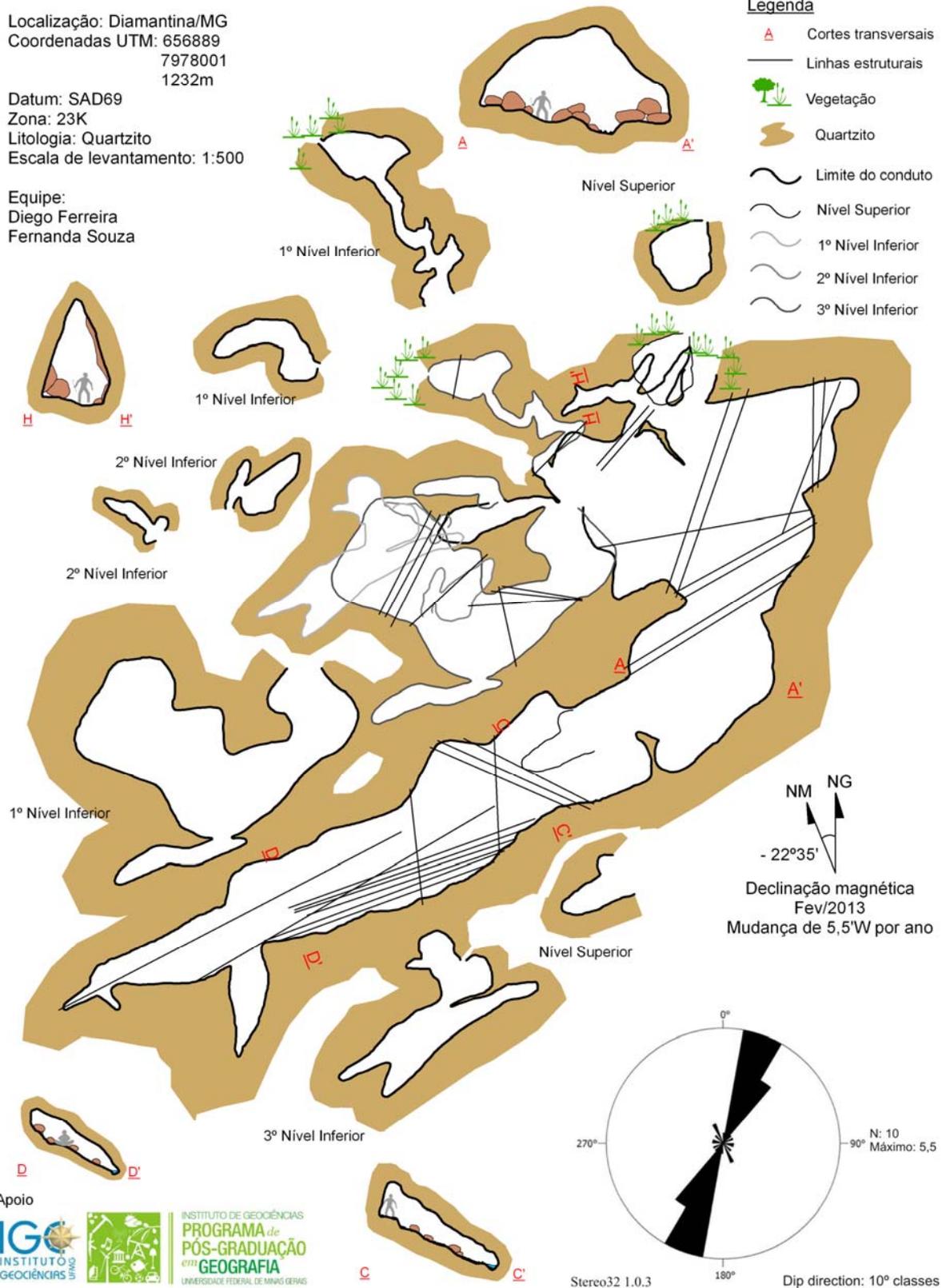


FIGURA 9.9 – Lineamentos estruturais na Gruta Extração

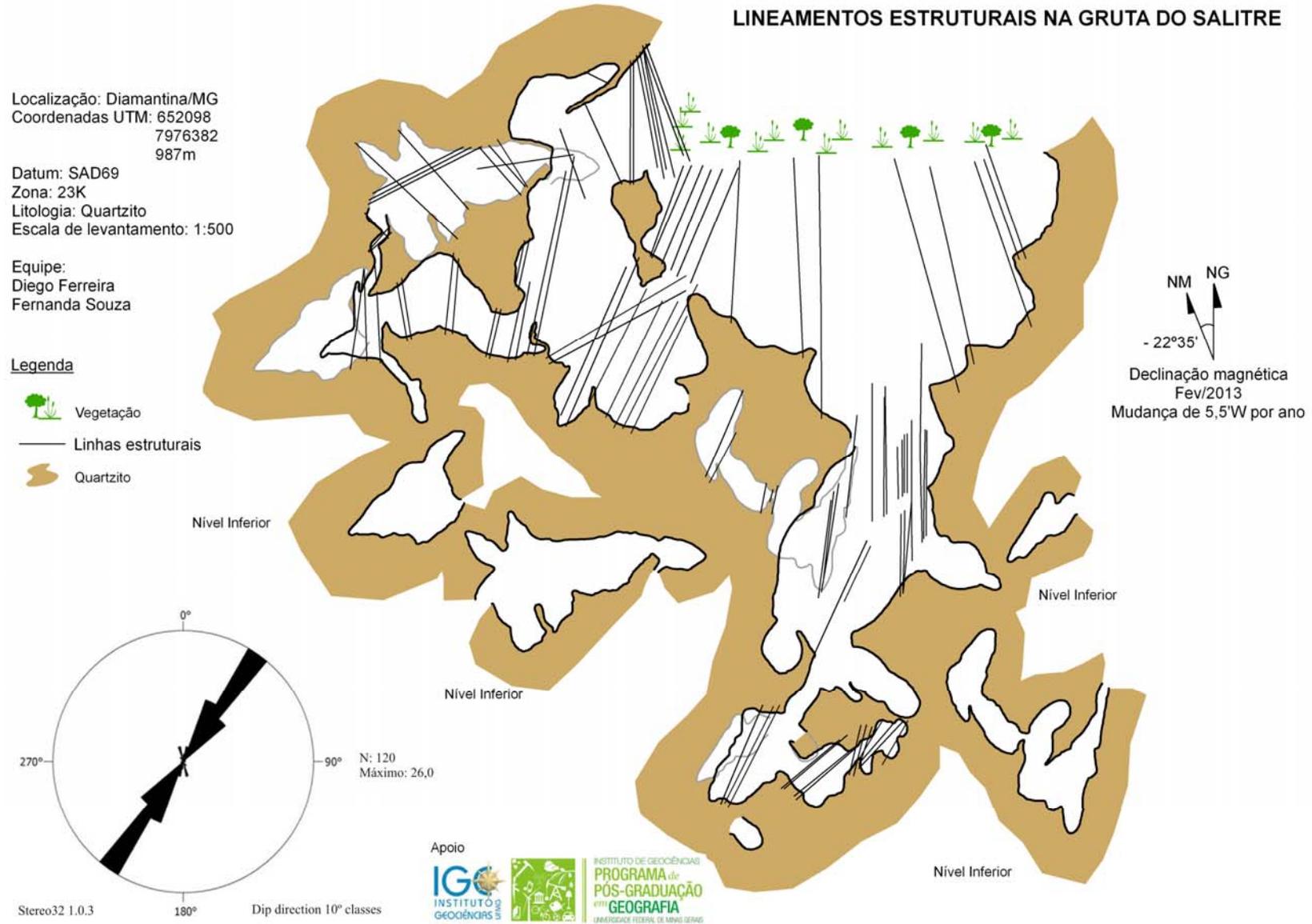


FIGURA 9.10 – Lineamentos estruturais na Gruta do Salitre

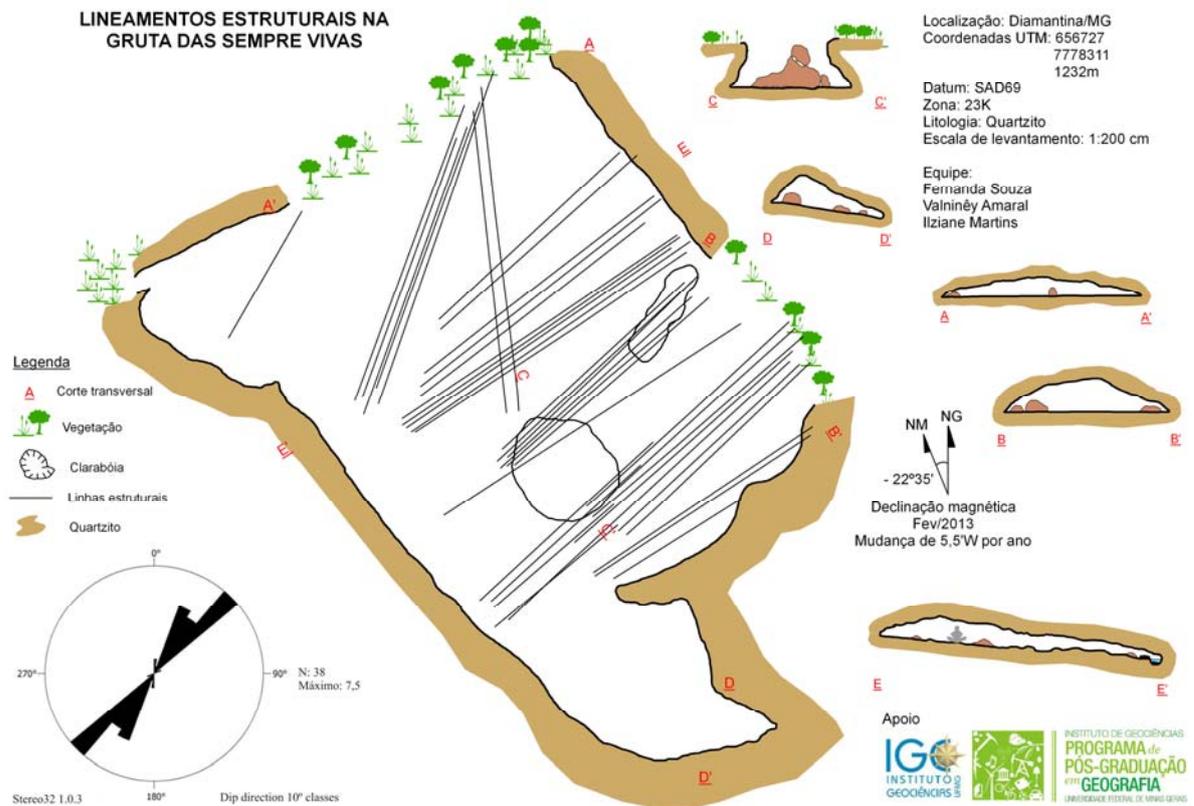


FIGURA 9.11 – Lineamentos estruturais na Gruta das Sempre Vivas

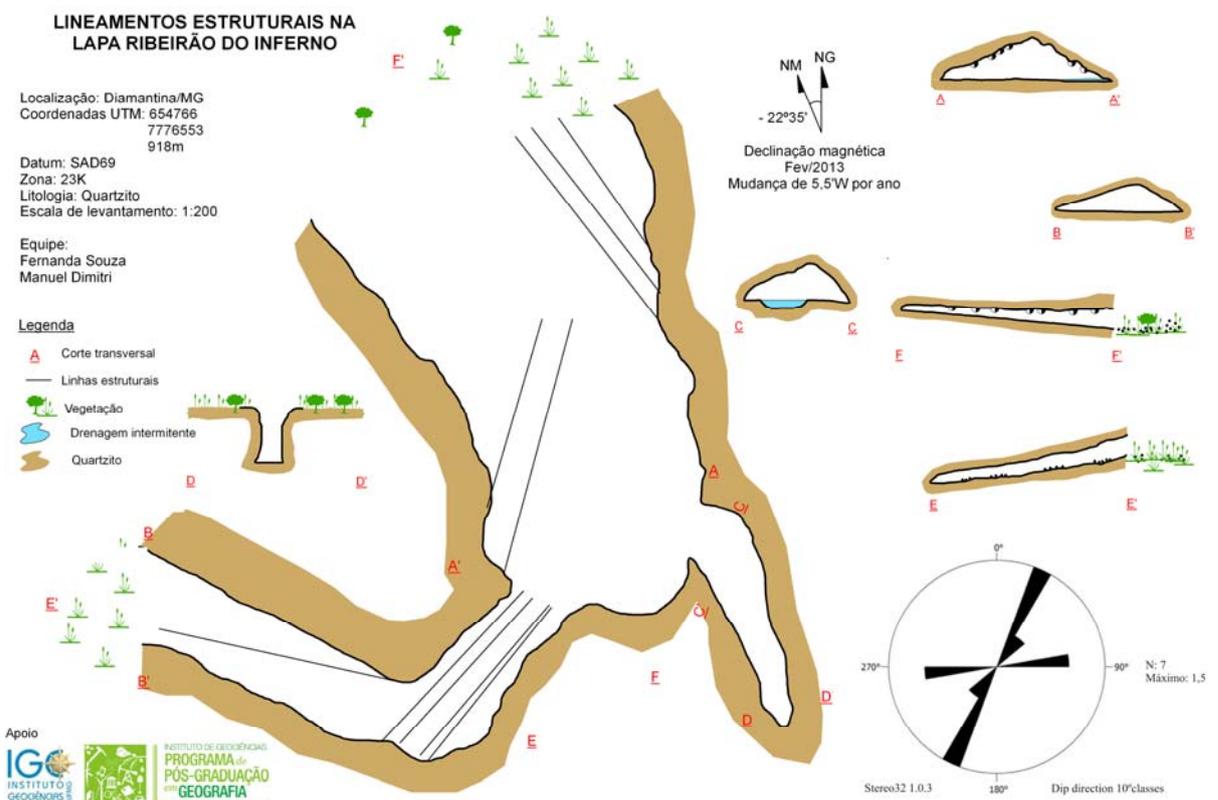


FIGURA 9.12 – Lineamentos estruturais na Lapa Ribeirão do Inferno

A FIG. 9.13 apresenta a correlação entre a direção dos planos de fratura identificados e mapeados no ambiente espeleológico, a direção dos seus condutos e a morfológica planimétrica de cada cavidade. Percebe-se que, em termos gerais, embora haja variações na sequência azimutal, todas as cavidades apresentam lineamentos estruturais internos com direção preferencial NE-SW.

Quanto à correlação entre a direção dos condutos e a direção preferencial dos planos de fraturamento internos, percebe-se que não houve nenhuma relação discordante (FIG. 9.13, QUADRO 9.1, GRAF. 9.1). A correlação entre esses parâmetros indicaram relação concordante ou irregular. As Grutas Ressurgência, Extração e do Salitre apresentam relação concordante e as Grutas Curralinho, das Sempre Vivas, Monte Cristo e Lapa Ribeirão do Inferno possuem relação irregular. Destaca-se, entretanto, que a quantidade de estruturas aferidas para os planos de fraturamento é superior à quantidade de condutos existentes. Neste sentido, a relação de concordância individual das cavidades deve ser relativizada, visto que a quantidade de atributos interfere na apresentação gráfica do diagrama de rosetas.

QUADRO 9.1

Relação entre direção preferencial dos planos de fraturamento internos e dos condutos das cavidades

Nome da cavidade	Planos de fraturamento internos		Condutos		Relação
	Direção preferencial	Quadrante	Direção preferencial	Quadrante	
Gruta Curralinho	N40-50E	NE-SW	N10-20E N60-70W	NE-SW NW-SE	Irregular
Gruta Ressurgência	N20-30E	NE-SW	N35-45E	NE-SW	Concordante
Gruta das Sempre Vivas	N40-50E	NE-SW	N30-40E N20-30W	NE-SW NW-SE	Irregular
Lapa Ribeirão do Inferno	N20-30E	NE-SW	N35-45E N10-30W N60-70W	NE-SW NW-SE	Irregular
Gruta Monte Cristo	N10-20E	NE-SW	N0-20E N0-10W N40-50W	NE-SW NW-SE	Irregular
Gruta Extração	N10-20E	NE-SW	N15-25E N40-60E	NE-SW	Concordante
Gruta do Salitre	N30-40E	NE-SW	N30-40E	NE-SW	Concordante

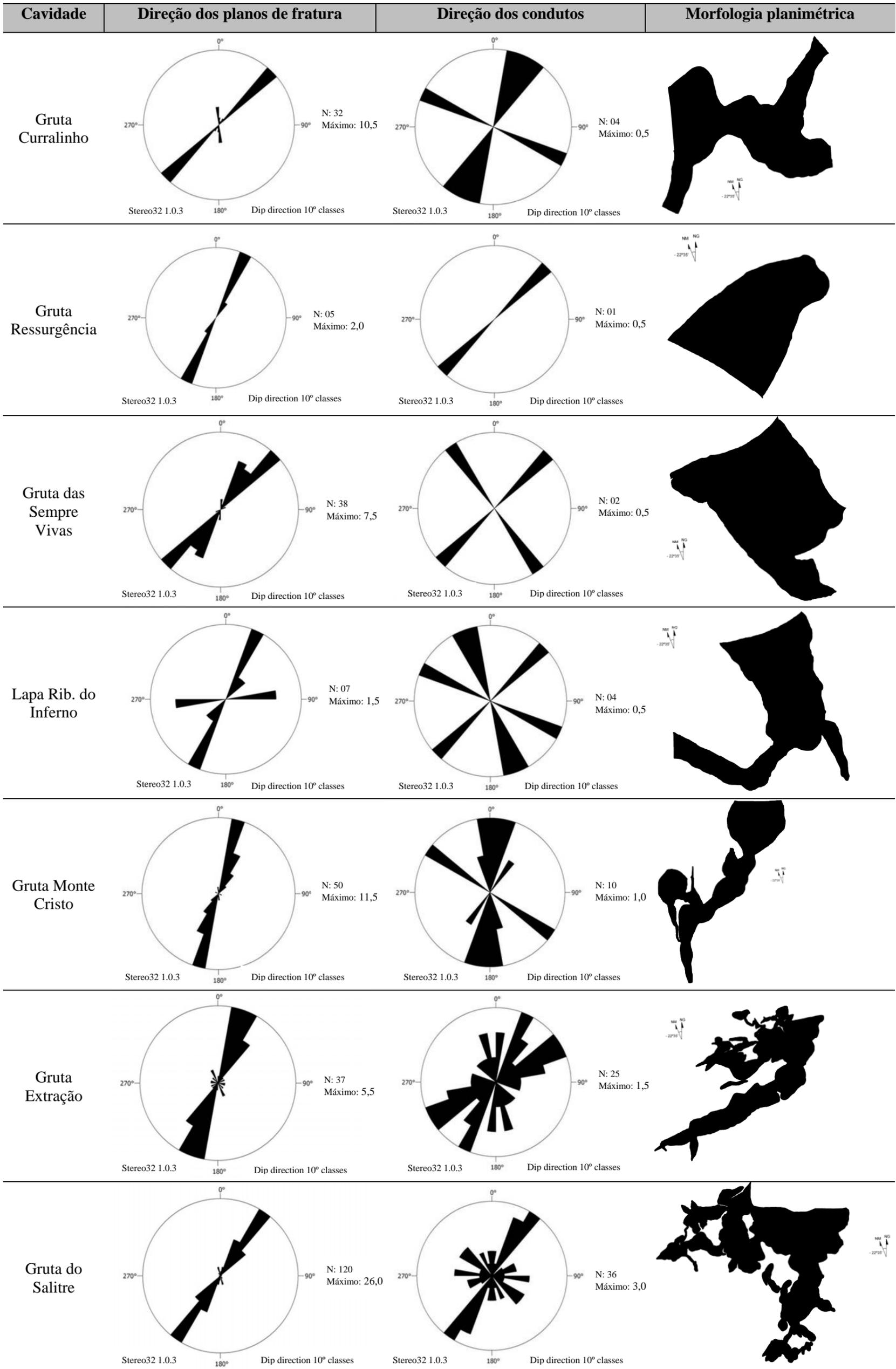


FIGURA 9.13 – Correlação direção dos planos de fratura internos, direção dos condutos e morfologia planimétrica das cavidades.

A investigação entre a direção dos condutos e a direção preferencial dos planos de fratura, em termos quantitativos, indica que 42,86% apresentam relação concordante e 57,14% possuem relação irregular (GRAF. 9.1). Ou seja, embora todas as cavidades possuam condutos orientados com a mesma direção dos planos de fratura, algumas cavidades possuem também condutos que não seguem apenas a direção preferencial desses lineamentos estruturais.

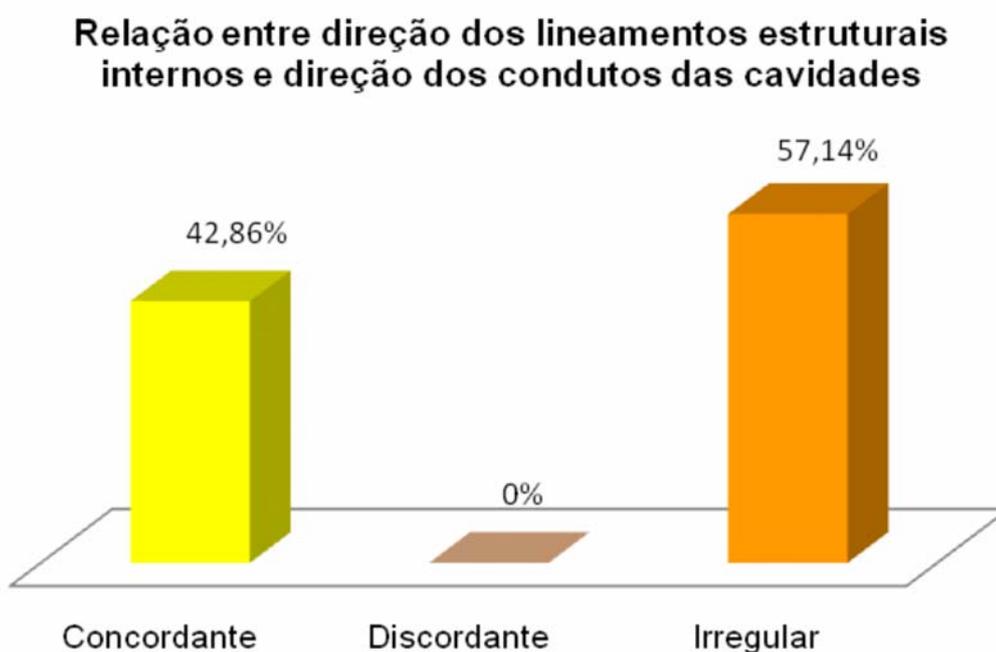


GRÁFICO 9.1 - Relação entre a direção dos lineamentos estruturais internos e a direção dos condutos das cavidades

A interpretação morfológica das cavidades evidencia que embora os planos de fratura sejam fatores estruturais que podem está associados ao processo de formação das cavidades, eles não correspondem aos condicionantes exclusivos de desenvolvimento morfológico. Afinal, as cavidades não apresentam predominância de condutos verticalizados, retilíneos, altos e estreitos.

A FIG. 9.14 apresenta o contexto estrutural geral na área de estudo. Esta figura também permite a correlação entre: a) direção dos planos de fratura na área externa; b) direção geral dos planos de fratura no interior de todas as cavidades; c) direção geral dos condutos de todas as cavidades investigadas; d) direção dos segmentos fluviais superficiais; e) direção dos planos de acamamento; f) mergulho dos planos de acamamento, g) direção da xistosidade e h) mergulho da xistosidade.

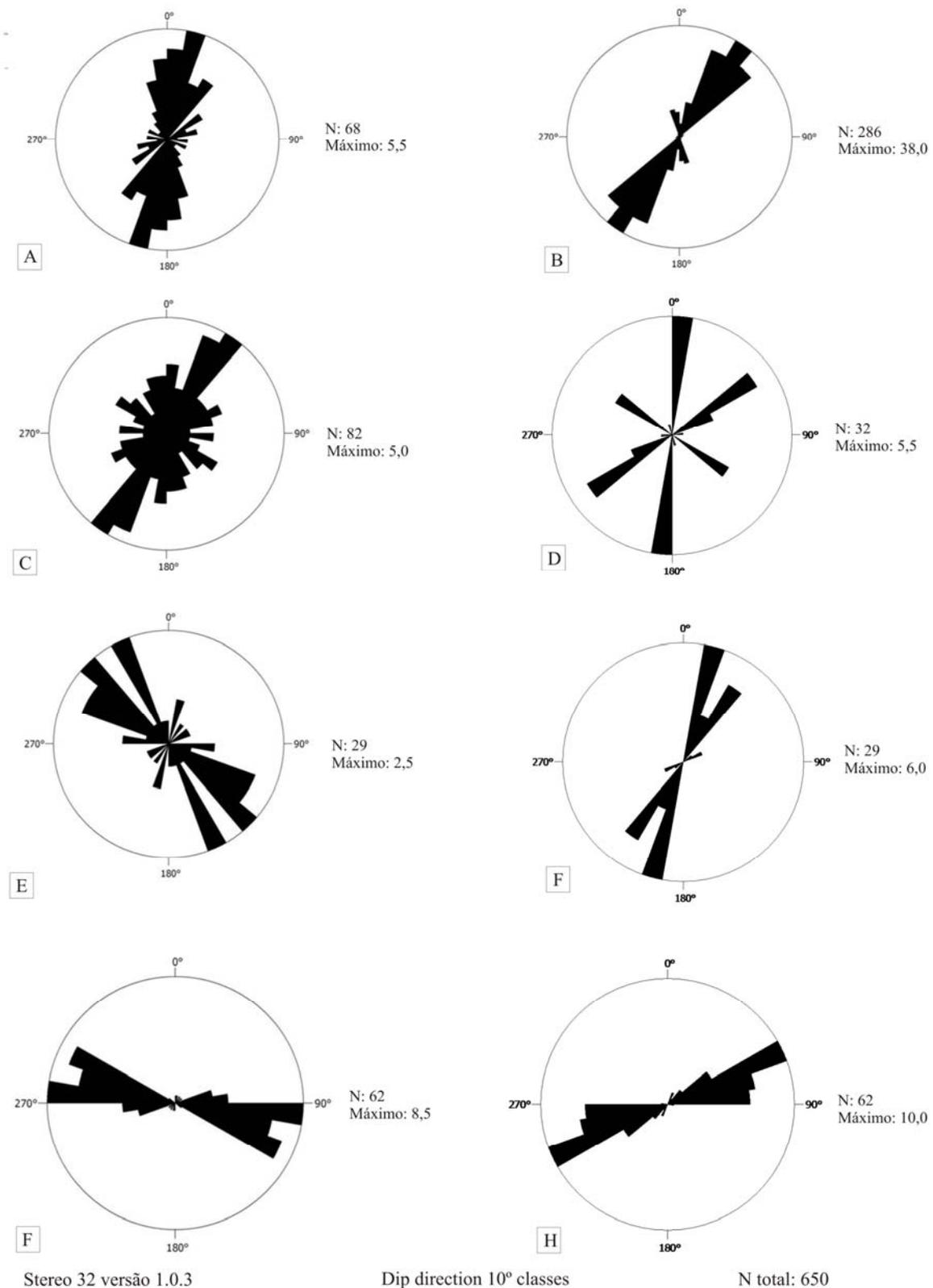


FIGURA 9.14 – Contexto estrutural de inserção das cavidades da região SE de Diamantina/MG. A) Direção dos planos de fratura na área externa; B) Direção dos planos de fratura no interior das cavidades; C) Direção dos condutos das cavidades investigadas; D) Direção dos segmentos fluviais superficiais; E) Direção dos planos de acamamento; F) Mergulho dos planos de acamamento; G) Direção da xistosidade; H) Mergulho da xistosidade.

A análise geral do contexto estrutural de inserção das cavidades na área de estudo indica que a direção preferencial dos planos de fratura da área externa, dos presentes no interior de todas as cavidades e a direção dos condutos de todas as cavidades são concordantes entre si. A direção dos segmentos fluviais superficiais é concordante com a direção da SdEM e com os planos de fratura superficiais, internos e dos condutos. A direção e mergulho dos planos de acamamento, por serem perpendiculares à direção dos planos de fratura, não apresentam relação direta com as direções preferenciais dos planos de fratura superficiais, internos e a direção dos condutos. A direção e mergulho da xistosidade também apresentam relação indireta com a direção dos condutos (FIG. 9.14).

As informações sobre os lineamentos estruturais presentes na região SE de Diamantina permitem constatar que, em síntese, o contexto estrutural apesar de não ser o único condicionante, é um fator que interfere diretamente no processo de formação das cavidades. Além disso, o contexto estrutural local contribui com a direção de desenvolvimento das cavidades, visto que, conforme registra a FIG. 9.14 a direção dos condutos é controlada em ordem de importância: a) pela direção dos planos de fratura; b) pela direção e mergulho dos planos de acamamento e xistosidade. Assim, as cavidades que apresentavam relação irregular entre a direção dos condutos e direção dos planos de fratura, podem estar associado à influência da direção e mergulho dos planos de acamamento.

9.1. Discussões

A caracterização do contexto estrutural de inserção das cavidades demonstra que planos de fratura, acamamento e xistosidade apesar de não serem os únicos, são fatores associados ao desenvolvimento das cavidades. A relação da influência dos lineamentos estruturais será discutida de acordo com sua influência na: a) direção dos condutos e b) morfologia das cavidades, incluindo o padrão planimétrico e os perfis transversais dos condutos.

Alguns autores (JENNINGS, 1971; SWEETING, 1972; DREYBRODT, 1998; FORD; WILLIAMS, 2007) mencionam a importância dos lineamentos estruturais no processo de formação e desenvolvimento do processo de carstificação. Afinal, essas feições geológicas estruturais favorecem a penetração de água na rocha encaixante e contribuem com o processo de reação química entre a água e os minerais primários.

Palmer (2009) discute a influência dos lineamentos estruturais como fatores controladores da direção e morfologia dos condutos das cavidades. No Brasil, poucos

trabalhos analisaram a relação da interferência dos lineamentos estruturais no desenvolvimento das cavidades formadas em quartzitos.

Fabri (2011) constata que, em síntese, as cavidades da região de Itambé do Mato Dentro são condicionadas preferencialmente pelo mergulho dos planos estratigráficos. A autora menciona que não há destaque a importância das fraturas como planos de fraqueza das rochas, favoráveis a penetração da água. Entretanto, salvo algumas exceções, o controle dos condutos pelas fraturas não são predominantes.

Silva (2004), por sua vez, afirma que nas cavidades desenvolvidas em quartzitos da Serra do Ibitipoca os principais fatores associados à formação das cavidades são os planos de fraturamento, seguidos pelo caimento da foliação. Silva (2004) acrescenta que estes dois tipos de estruturas foram de extrema relevância para a formação do modelado cárstico subterrâneo na Serra do Ibitipoca.

Segundo Corrêa Neto e Baptista Filho (1997) as galerias mais extensas das cavidades da Serra do Ibitipoca (600 a 2750m de desenvolvimento linear) possuem controle estrutural e estratigráfico. Essas cavidades são condicionadas por fraturas NE e, mais raramente, N-S. Os autores mencionam que as fraturas NW e E-W geralmente condicionam galerias menores ou pequenos desvios na direção das maiores.

Constata-se que na região SE de Diamantina os fatores estruturais associados ao desenvolvimento das cavidades são, primeiramente, os planos de fratura, seguido do mergulho do acamamento e planos de foliação. Afinal, a direção preferencial dos condutos (NE-SW) é concordante principalmente com a direção dos planos de fratura (NE-SW) e posteriormente com a direção e mergulho dos planos de acamamento (NW-SE).

A respeito do aspecto morfológico, segundo Dreybrodt (1998), Ford e Williams (2007) e Palmer (2009) os padrões dos condutos dependem da presença ou ausência de planos de acamamento, falhas, fraturas e juntas. Não foram verificados estudos que aprofundasse as análises sobre a relação entre os lineamentos estruturais e a morfologia das cavidades desenvolvidas em quartzitos.

Entre os tipos de lineamentos estruturais, os planos de fratura e de acamamento contribuem para a ocorrência de diferentes características morfológicas nas cavidades. De acordo com Palmer (2009), as cavidades que seguem os planos de acamamento tendem a serem sinuosas e os perfis transversais possuem seção elíptica ou lenticular alongados ao longo dos planos de acamamento. Palmer (2009) acrescenta que as cavidades cujo desenvolvimento está associado aos planos de fratura apresentam condutos morfológicamente

com padrão angular alto, composto por altura relativa, é estreito e possui segmentos retos que interceptam vários ângulos, mais comumente próximo ao ângulo reto.

Essas informações corroboram com a morfologia dos perfis transversais das cavidades analisadas na área pesquisada. Observa-se que os condutos, em geral, apresentam perfis transversais retangulares, triangulares e elípticos horizontais ou suavemente inclinados o que está associado especialmente ao padrão recorrente de cavidades influenciadas por planos de acamamento.

Os lineamentos estruturais também influenciam no padrão planimétrico das cavidades. Conforme Palmer (2009), cavidades com padrão planimétrico em rede são restritas para rochas fraturadas, pois a forma de recarga ocorre principalmente pelas próprias fraturas, o que favorece a origem deste padrão morfológico.

Constata-se que as cavidades na área de estudo possuem padrões planimétricos que não se encaixam perfeitamente na classificação de Palmer (2009). No entanto, algumas cavidades, como a Gruta do Salitre, Gruta Extração, Gruta Monte Cristo, Gruta Curralinho e Lapa Ribeirão do Inferno, possuem padrões planimétricos que indicam a influência dos planos de fratura no desenvolvimento das cavidades.

Considerando que há uma relação entre os planos de fraturas e o mergulho dos planos de acamamento na área de estudo, deve ressaltar que a interação entre esses tipos de lineamentos estruturais contribuem com a formação e morfologia planimétrica das cavidades na região SE de Diamantina. De acordo com Palmer (2009), rochas com mergulhos suaves associado a fraturas e juntas, geralmente apresentam morfologia vertical ou suavemente inclinada. Mergulhos íngremes ou rochas dobradas têm um padrão de fraturas complexo. Cavidades controladas ambas por planos de acamamento e juntas têm um espectro contínuo de separações. Morfológicamente essas cavidades possuem tubos sinuosos e onde há fraturas e juntas cruzadas os condutos formam fissuras menores nos tetos e paredes das cavidades (PALMER, 2009).

Essa afirmação é concordante com os aspectos morfológicos e estruturais observados na área de estudo, visto que o mergulho dos planos de acamamento possui em geral 20 a 30° (mínimo 10°, máximo 65°), o que contribui para o desenvolvimento de condutos suavemente inclinados na área de estudo.

10. CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO DE DESENVOLVIMENTO DAS CAVIDADES

A área de estudo está inserida geomorfologicamente, em termos regionais, no Planalto Diamantina, caracterizada por relevo ondulado a suave ondulado. A área pesquisada é composta por planícies, relevos residuais, escarpas e vertentes dissecadas e relevo suave ondulado.

As planícies envolvem superfícies periodicamente inundadas e são expressivas, principalmente, nas margens do Ribeirão do Inferno e Córrego Junta-Junta. Observa-se a ocorrência de vertentes e escarpas dissecadas em áreas com declividade entre 8 e 20%. A área de relevo suave ondulado apresenta declividade entre 3 e 8% e possui morfologia pouco movimentada. Observa-se que as cavidades localizam-se principalmente nas áreas de vertentes e escarpas dissecadas. Portanto, percebe-se que as áreas com vertentes e escarpas dissecadas são mais favoráveis ao desenvolvimento de cavidades (FIG. 10.3 e 10.4).

A FIG. 10.1 mostra o contexto geomorfológico geral da área de estudo e a FIG. 10.2 registra o contexto geomorfológico local e evidencia as de planície, vertentes e escarpas dissecadas e relevo suave ondulado. A FIG. 10.3, por sua vez, apresenta o modelo digital de elevação da área de estudo, observa-se que a maioria das cavidades localiza-se nas áreas mais elevadas da superfície. Esta condição geomorfológica pode ser favorável ao desenvolvimento dessas cavidades, pois apresentam gradiente de relevo que contribui para a percolação hídrica nos maciços.

A FIG 10.4 registra os perfis topográficos gerais da área de estudo no sentido N-S e E-W e permite a observação das características geomorfológicas da área pesquisada. A FIG. 10.5 mostra os perfis topográficos das vertentes de inserção das cavidades na área de estudo. Observa-se que todas as cavidades apresentam desenvolvimento concordante e paralelo ao caimento da vertente, sendo que 14,29% possui desenvolvimento no sentido do aclave e 85,71% desenvolvem no sentido do declive da vertente (GRÁF. 10.1). No caso da Lapa do Ribeirão do Inferno que possui desenvolvimento paralelo à inclinação da vertente no sentido do aclave, destaca-se a hipótese da relação de hierarquia de drenagem favorecer este tipo de morfologia. Afinal, a drenagem intermitente surge no interior da cavidade e flui em direção ao Ribeirão do Inferno.

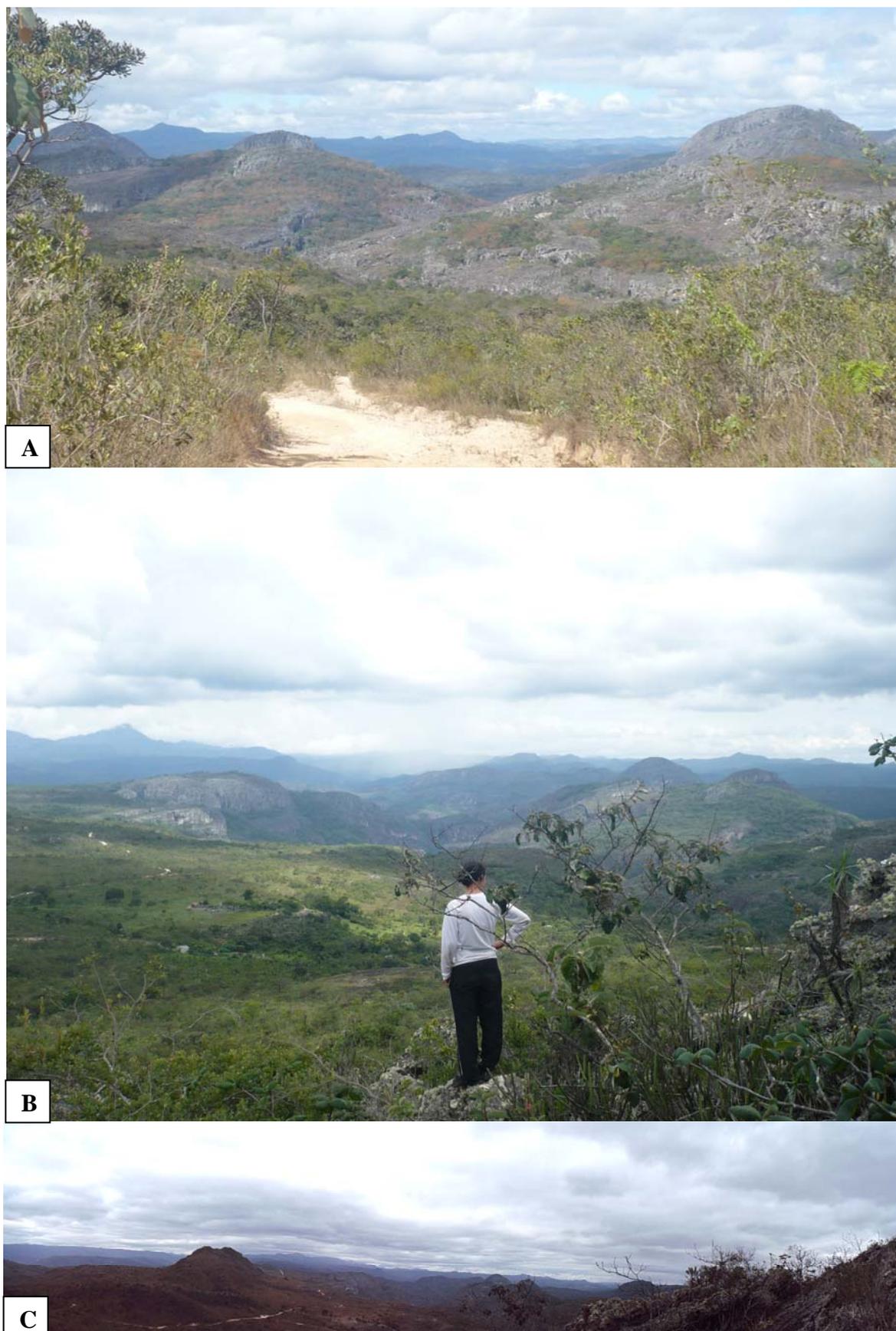


FIGURA 10.1 – Geomorfologia da área de estudo. A) Estrada Extração – Fazenda Cavalo Morto. B) Vista observada a partir do maciço da Gruta Extração. C) Próximo à Fazenda Cavalo Morto. Fotos: Fernanda Souza (A, C) e Diego Rocha (B)

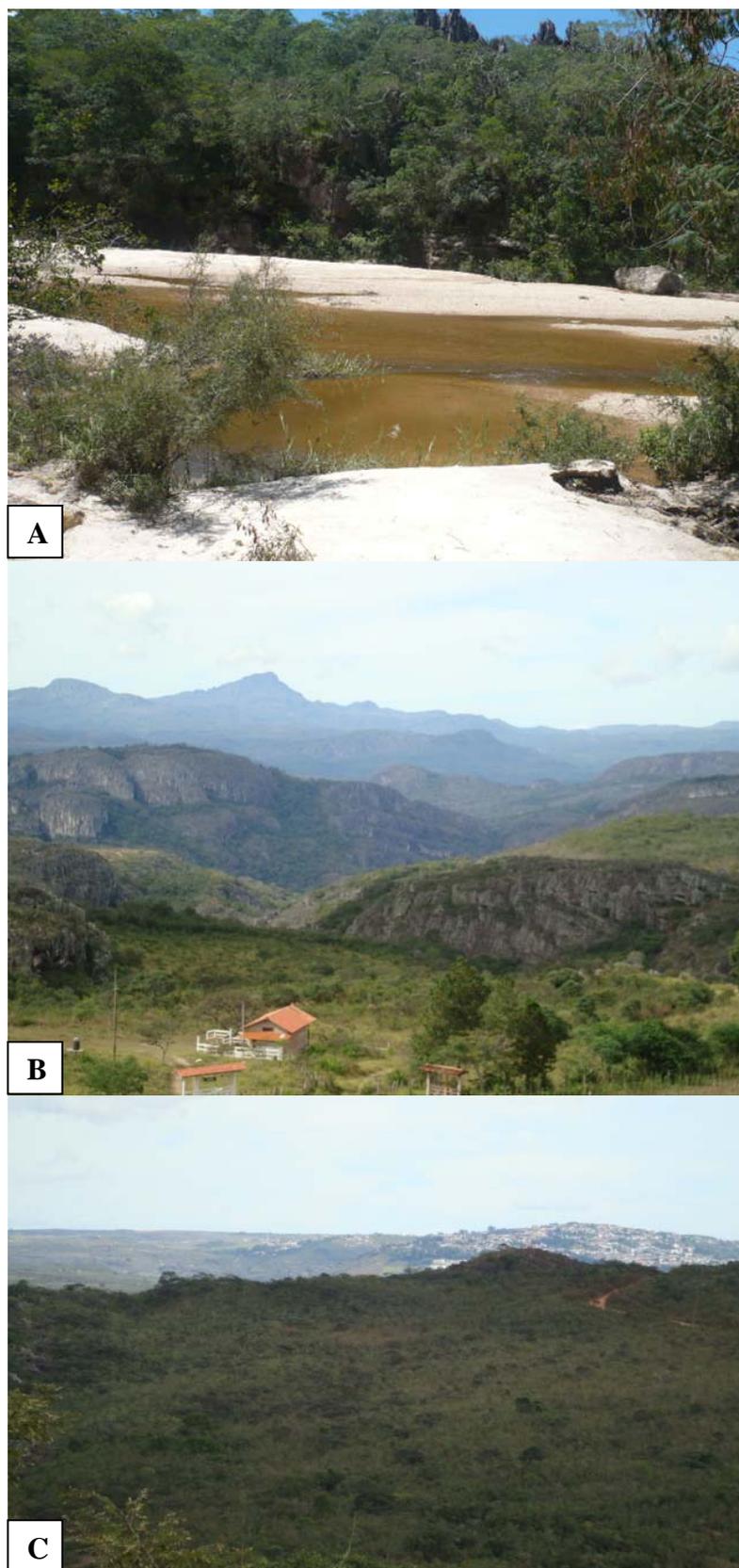


FIGURA 10.2 – Contexto geomorfológico local. A) Planície do Ribeirão do Inferno, vista a partir da Lapa do Ribeirão do Inferno. B) Escarpas dissecadas, próximo à Fazenda O Mulatinho. C) Relevo suave ondulado, vista a partir do Cruzeiro em Extração, no segundo plano observa-se a área urbana de Diamantina. Fotos: Fernanda Souza (2012)

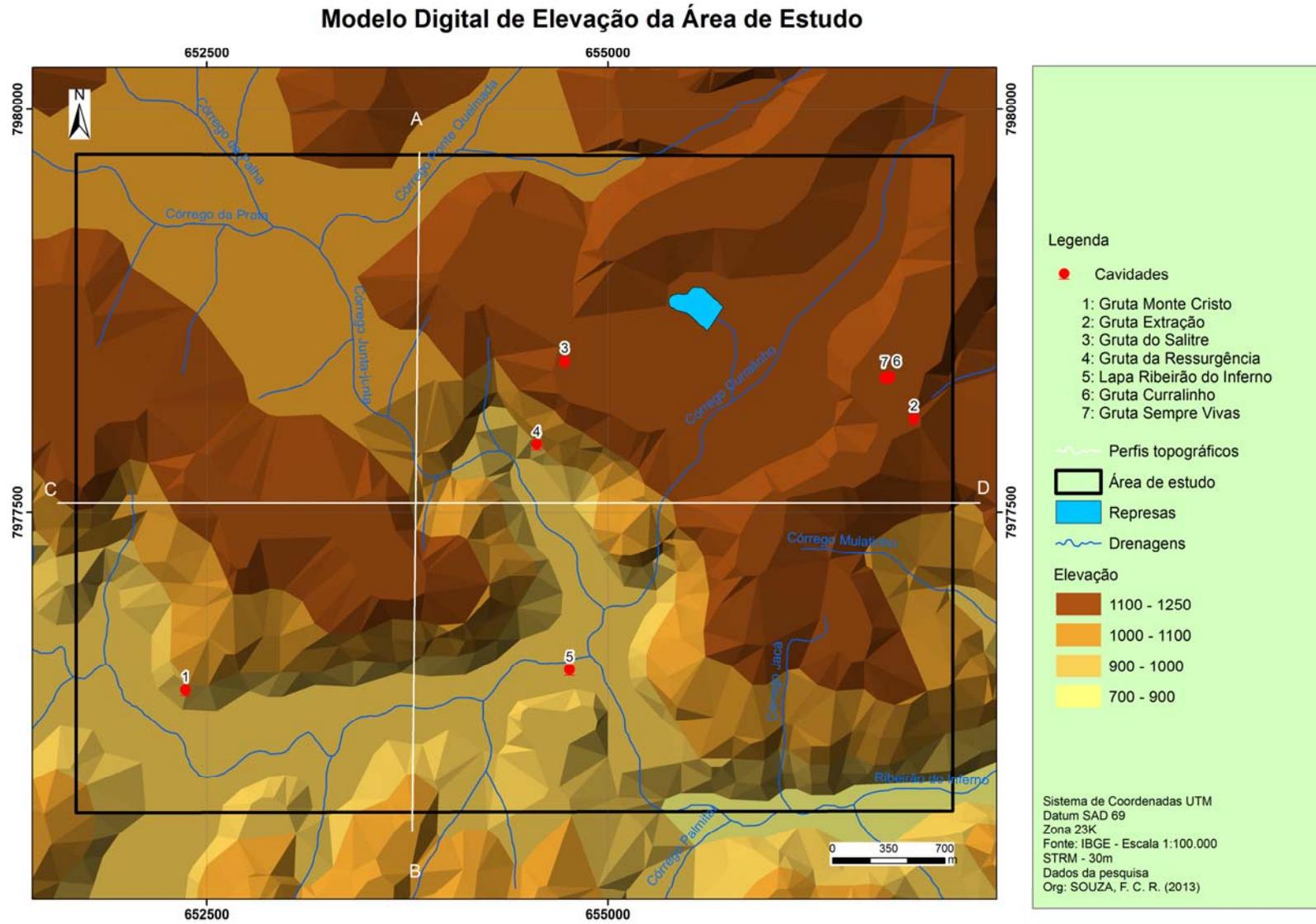


FIGURA 10.3 - Modelo digital de elevação da área de estudo

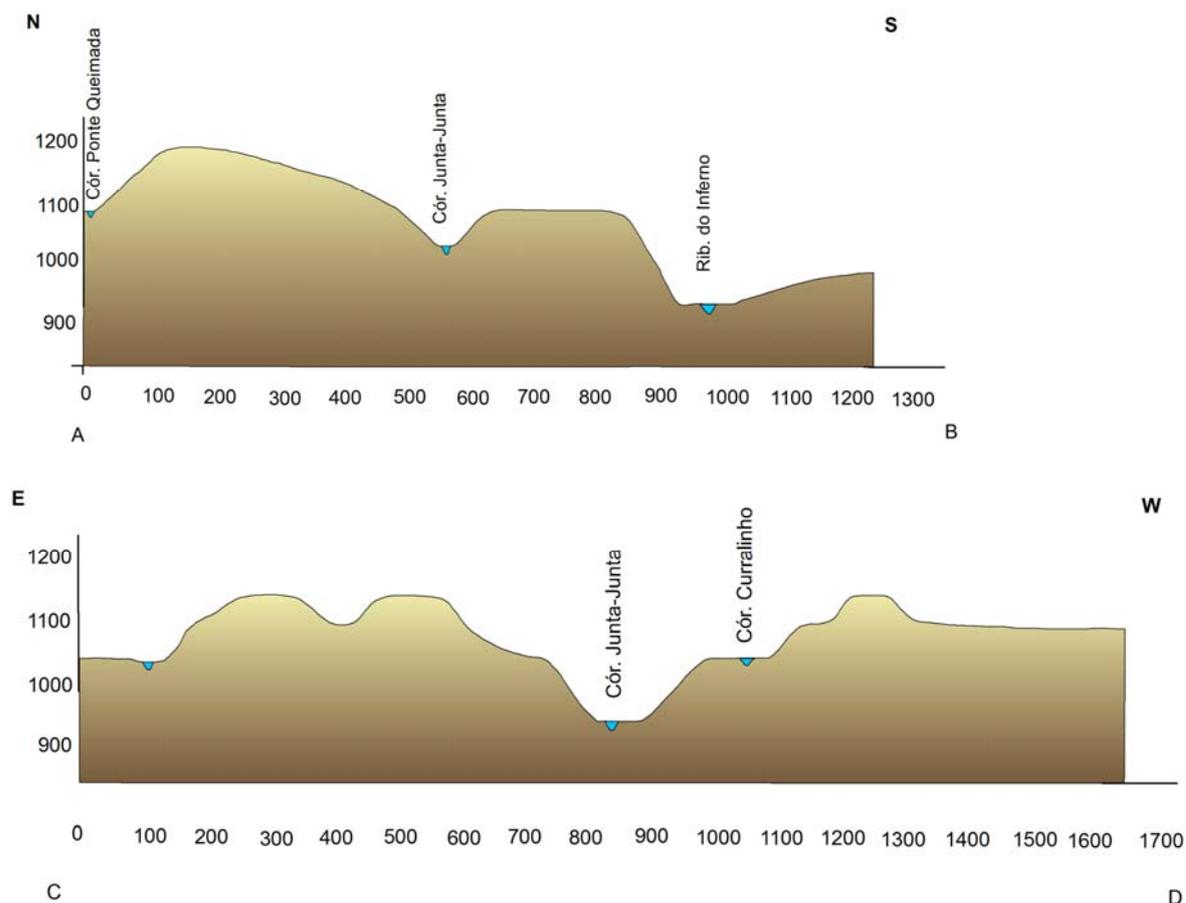


FIGURA 10.4 – Perfis topográficos da área de estudo.

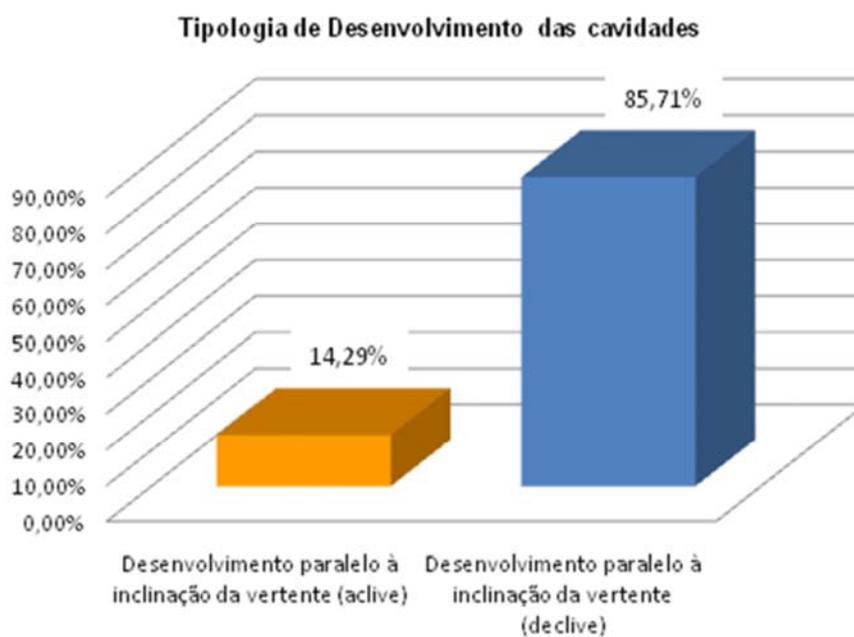


GRÁFICO 10.1 – Tipologia de Desenvolvimento das cavidades

Direção dos Perfis Topográficos na Área de Estudo

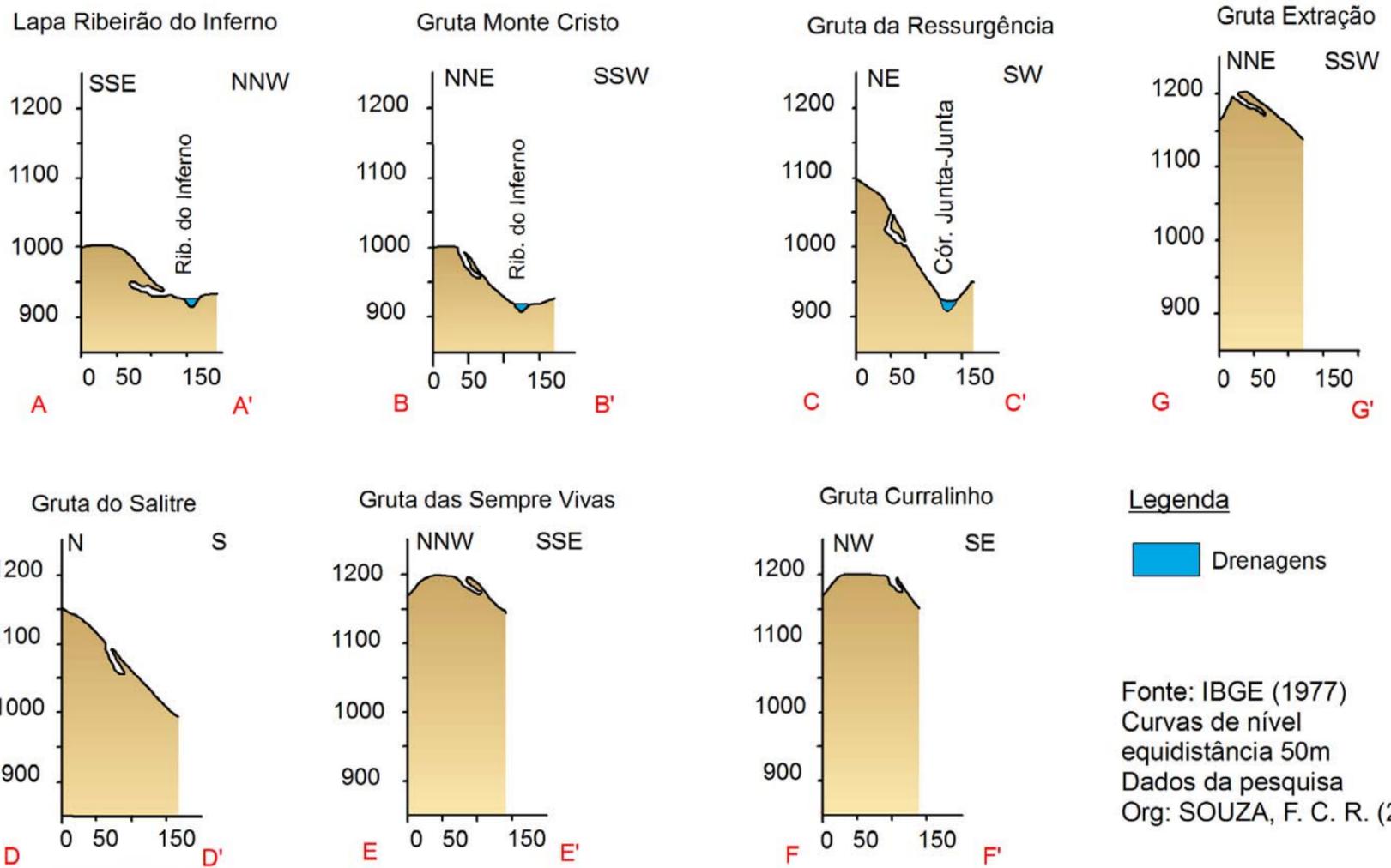
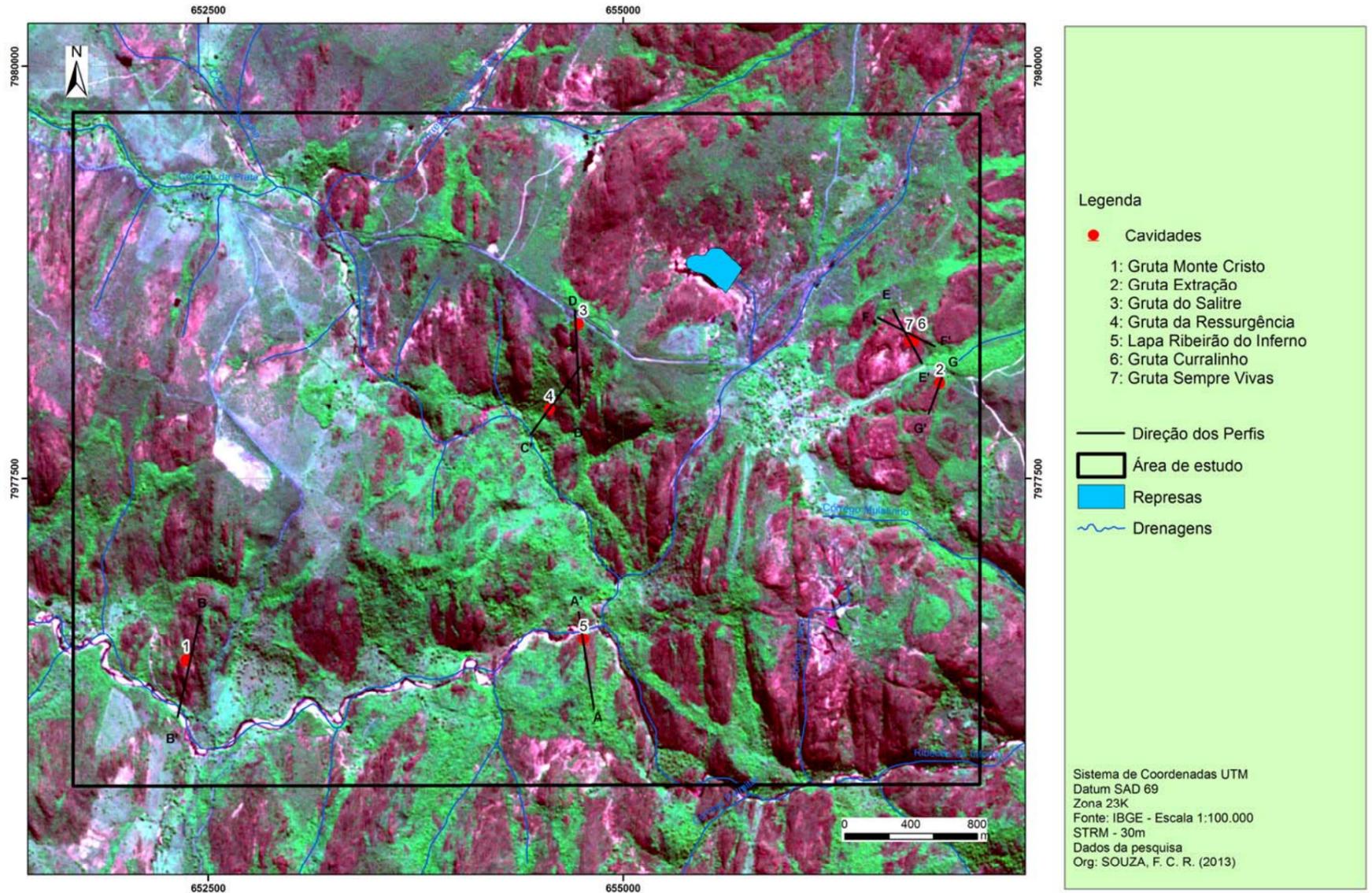


FIGURA 10.5 – Perfis topográficos das vertentes de inserção das cavernas na área de estudo

Devido à concordância existente entre o desenvolvimento morfológico das cavidades e à inclinação ou caimento da vertente, constata-se que a geomorfológica local contribui para a ocorrência e desenvolvimento das cavidades. O QUADRO 10.1 mostra os gradientes de relevo local e regional, bem como a projeção horizontal e desnível das cavidades investigadas. O GRÁF. 10.2 evidencia que não há relação direta entre o gradiente de relevo local e a projeção horizontal das cavidades. O GRÁF. 10.3, por sua vez, registra que, embora não seja unanimidade, na maioria dos casos há relação positiva entre o gradiente de relevo e o desnível das cavidades.

QUADRO 10.1

Gradiente de relevo e projeção horizontal das cavidades

Cavidade	Gradiente do relevo regional (%)	Gradiente do relevo local (%)	Projeção Horizontal (m)	Desnível (%)
Gruta do Salitre	8 a 20	19,0	593,5	28
Gruta Monte Cristo	8 a 20	14,2	216	20
Gruta Extração	8 a 20	18,7	387	23
Lapa Ribeirão do Inferno	8 a 20	14,0	25	1
Gruta das Sempre Vivas	8 a 20	6,8	22	5
Gruta Curralinho	8 a 20	6,8	40,5	7
Gruta da Ressurgência	8 a 20	29,3	9,6	2,7

Relação entre Gradiente de Relevo e PH

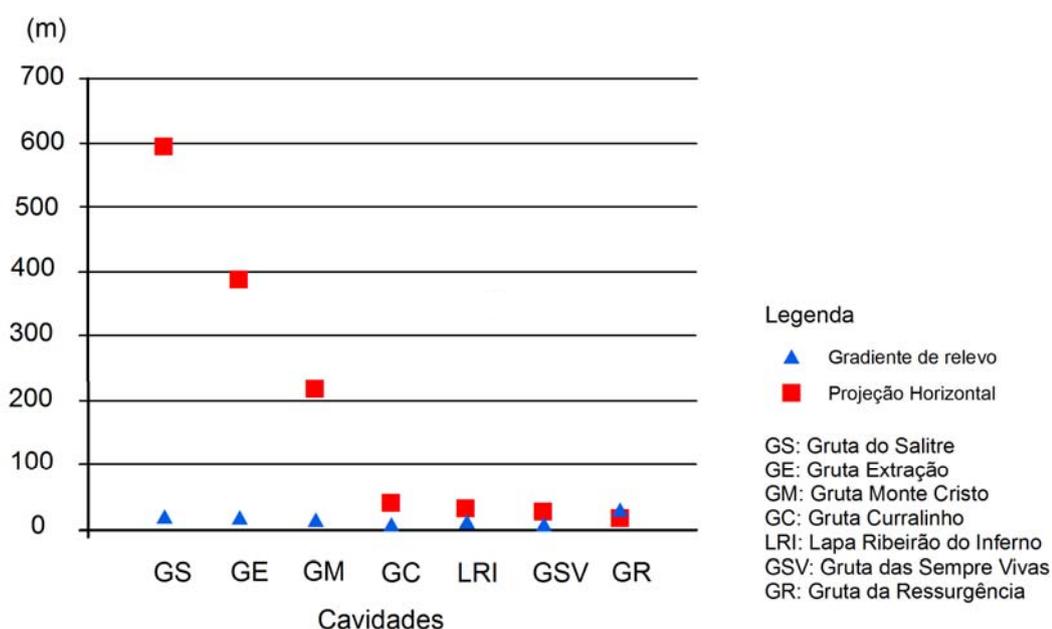


GRÁFICO 10.2 – Relação gradiente de relevo local e projeção horizontal das cavidades

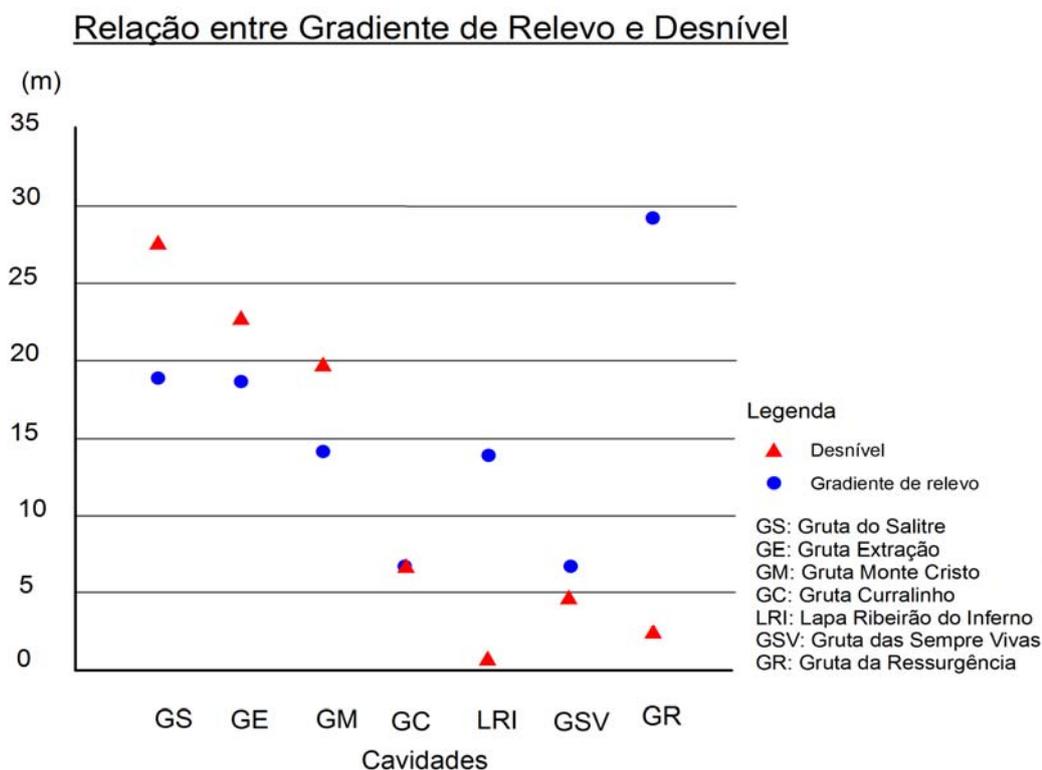


GRÁFICO 10.3 – Relação gradiente de relevo local e desnível das cavidades

10.1. Discussões

Destaca-se que o relevo da área de estudo é modelado predominantemente sobre quartzitos do Supergrupo Espinhaço. As formas de relevo resultam da dissolução, processos de intemperismo químicos e mecânicos, pela dissecação fluvial e da interferência dos fatores endógenos. Percebe-se que a geomorfologia local também é marcada por irregularidades no relevo influenciadas por variações estratigráficas e estruturais.

Os dados permitem constatar que a geomorfologia local contribui para o desenvolvimento de cavidades na área de estudo, haja vista que a ocorrência das cavidades é concordante com a inclinação da vertente e na maioria dos casos há relação positiva entre gradiente do relevo local e o desnível das cavidades. Destaca-se também que a presença de escarpas dissecadas são áreas favoráveis à ocorrência de cavidades na área investigada.

Poucos trabalhos procuraram correlacionar as cavidades e demais feições cársticas desenvolvidas em quartzito com o contexto geomorfológico local e regional. Corrêa Neto *et al.* (1997), Corrêa Neto (1997) e Silva (2004) afirmam que sem o gradiente de relevo e hidráulico existente na Serra do Ibitipoca, provavelmente não haveria a ocorrência de cavidades com a magnitude existente nesta localidade. Fabri (2011) constata que não é

possível estabelecer relação clara entre o gradiente de relevo regional e o desenvolvimento das cavidades na região de Itambé do Mato Dentro.

A interpolação entre as feições exocársticas e a compartimentação geomorfológicas da área de estudo demonstra que não é regra, mas a maioria das feições cársticas da área de estudo estão localizadas nas áreas com vertentes côncovas e escarpas dissecadas. Essas características podem estar associadas à afirmação de alguns autores, segundo a qual, a ruptura de declive favorece o desenvolvimento de feições cársticas.

11. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CONTEXTO GEOGRÁFICO DE INSERÇÃO DAS FEIÇÕES CÁRSTICAS NA REGIÃO SUDESTE DE DIAMANTINA/MG

A ocorrência de feições cársticas na área de estudo pode estar relacionada a um conjunto de fatores, sem se restringir exclusivamente a apenas um condicionante. Destaca-se que embora este trabalho enfatiza a interpretação dos fatores litoestruturais e geomorfológicos, o clima e hidrologia são condicionantes que podem interferir na formação das feições cársticas na área de estudo. Assim, embora seja necessário o desenvolvimento de estudos e usos de técnicas específicas para a análise aprofundada dos fatores climáticos e hidrológicos, o levantamento horizontalizado de dados sobre esse assunto permite a indicação de alguns resultados. O QUADRO 11.1 sintetiza a relação de como os indicadores geográficos contribuem e inibem o desenvolvimento das feições cársticas na área investigada.

Em relação aos indicadores climáticos, levanta-se a hipótese que a variável temperatura ambiente local inibe a dissolução das rochas e formação das feições cársticas. O clima atual apresenta temperatura média anual de 18 a 19°C (INMET, 2012), mas deve-se considerar que durante o Pleistoceno as temperaturas eram ainda mais baixas (OLIVEIRA, 1992). Assim, conclui-se que a temperatura local seria insuficiente para se acelerar quimicamente a dissolução da sílica.

A precipitação e a umidade relativa do ar, por sua vez, são fatores que podem ter contribuído para o desenvolvimento das feições cársticas locais. Destaca-se que a precipitação média atual equivale 1404 mm anuais (INMET, 2012) e durante o Pleistoceno poderiam apresentar índices superiores. A interpretação da influência climática pode ser sustentada a partir de dados que extrapolam a área de estudo. Oliveira (1992) interpreta, através de estudo de pólenes em sedimentos e datação C^{14} em duas lagoas em Lagoa Santa, que durante o Pleistoceno Superior (19 a 13ka) havia um clima com umidade alta e temperaturas baixas. Cartelle (1994) ressalta que por volta de 12ka houve mudança ambiental responsável pela extinção da megafauna pleistocênica. Oliveira (1992) afirma que durante o Holoceno Inferior ocorreu clima mais seco e perdurou até aproximadamente 4ka. Köhler (1989) reinteram que no Holoceno Superior houve a retomada de clima com maior umidade.

Ressalta-se que os índices pluviométricos da região SE de Diamantina são inferiores aos registrados em regiões equatoriais, como onde se desenvolveram os *tepuys* venezuelanos, que apresentam até 4000 mm anuais (SZCZERBAN; URBANI, 1974). Porém, os volumes pluviométricos da área de estudo são superiores aos presentes nas regiões da África Subsaariana, onde a média anual varia entre 20 a 30 mm anuais (WILLEMS *et al.*, 2006).

Acentua-se que esse parâmetro na localidade investigada é próximo aos índices observados na Serra do Ibitipoca (1500 mm anuais), onde há ocorrência de uma das maiores cavidades em quartzito no Brasil e ao registrado na região de Itambé do Mato Dentro, onde a precipitação média anual oscila entre 1300 e 1600mm (ICMBio, 2009). A umidade relativa do ar apresenta relação semelhante à precipitação, visto que possui máxima de 89,7% e mínima de 72,3% (INMET, 2012), o que contribui para a dissolução da rocha (QUADRO 11.1).

QUADRO 11.1

Indicadores que contribuem e inibem o desenvolvimento de feições cársticas

Variável	Contribuem	Inibem
Clima	Precipitação média anual de 1400mm Umidade relativa do ar: máxima 89,7% mínima 72,3%	Temperatura média anual: 18° a 19°C
Hidrologia	Fluxo pluvial Fluxo hidrogeológico Fluxo fluvial	
Litologia	Polimineralização (especialmente CaO, MgO, K ₂ O) Presença de mica: 1 a 36% Ocorrência de feldspato: 1 a 8% Baixa concentração de Al ₂ O ₃ : 0,55 a 0,26 % Heterogeneidade granulométrica Foliação dos minerais Espaço poroso nos conglomerados	Metamorfismo de baixo grau Porosidade primária, principalmente dos quartzitos monomíticos
Estrutural	Facilita a infiltração e percolação hídrica Planos de xistosidade Planos de fratura e acamamento contribuem para o desenvolvimento de: - condutos com direção concordante com planos de fratura e de acamamento; - perfis transversais elípticos, triangulares e retangulares, influenciados principalmente pelos planos de acamamento; - condutos suavemente inclinados a inclinados concordantes com o mergulho dos planos de acamamento (20 a 30°);	
Geomorfologia	Relevo com colinas convexas dissecadas Gradiente de relevo local Inclinação das vertentes Facilita a remobilização mecânica dos grãos alterados	

Constata-se que a litologia em si não corresponde ao principal fator responsável pelo desenvolvimento de feições cársticas na área investigada, entretanto vários aspectos litológicos locais contribuem para a sua ocorrência. Registra-se que a litologia local composta por quartzitos e conglomerados da Formação Sopa-Brumadinho apresenta baixo grau de metamorfismo e esse fator inibe a porosidade primária. Esse fator, portanto, restringe o

contato da água com os minerais e limita a dissolução da rocha encaixante. Assim, se os quartzitos forem comparados com os carbonatos, observa-se que a composição mineralógica e a porosidade primária dos carbonatos são superiores aos quartzitos, o que justifica a dimensão das feições desenvolvidas em ambos os contextos litológicos.

A composição mineralógica dos quartzitos, constituída predominantemente por quartzo e, provavelmente, sílica amorfa, apresenta respectivamente taxas de solubilização entre 12 e 120mg/l, o que é inferior ao registrado para a calcita (60 a 400mg/l) e dolomita (50 a 300mg/l), conforme Ford e Williams (2007). Porém, a análise mineralógica das rochas da área investigada apresenta a ocorrência de poliminerais, incluindo a composição de mica (1 a 36%) e feldspato (1 a 8%). Nesse sentido, como a mica (filossilicato) e o feldspato (tectossilicato) possuem taxas de solubilidade superiores ao quartzo, esses minerais tendem a solubilizarem, facilitarem a reação química entre a água e a sílica, assim como contribuirão para a desagregação da rocha. Destaca-se que as maiores taxas de mica e feldspato foram registradas nos paraconglomerados e ortoconglomerados.

Enfatiza-se que a foliação mineral observada nas rochas quartzíticas da área de estudo favorecem a formação de feições cársticas, uma vez que funcionam como descontinuidades preferenciais para os processos geoquímicos e facilitam a dissolução e desagregação mineral. Destaca-se que a heterogeneidade granulométrica também é uma variável que favorece a solubilidade. Considerando que a heterogeneidade granulométrica e proporção de arcabouço possuem a seguinte ordem crescente: quartzitos monomíticos < paraconglomerados < ortoconglomerados; verifica-se que ao atingir o nível estratigráfico dos ortoconglomerados, as cavidades tendem a serem maiores. A ampliação das cavidades ocorre devido à heterogeneidade granulométrica e a maior proporção de arcabouço dos ortoconglomerados permitirem a ocorrência de espaços porosos, o que facilita a penetração da água. A composição granulométrica associada à composição mineralógica composta por maiores concentrações locais de mica e feldspato (quartzitos monomíticos < paraconglomerados < ortoconglomerados) facilita a dissolução da rocha e a abertura de protocondutos.

Assim, constata-se os quartzitos monomíticos, devido a sua composição micácea são favoráveis ao desenvolvimento das cavidades. Afinal, o maior número quantitativo de cavidades é encontrado nas fácies de quartzitos monomíticos. Entretanto, quando o fluxo hídrico atinge os níveis de paraconglomerados e ortoconglomerados a dissolução tende a ocorrer, desagregar os minerais presentes e condicionar a desestruturação e perda de volume dos conglomerados. Esses processos químicos tendem a ocorrer associados ao *piping*, o que condiciona a remoção do material residual e o alargamento dos condutos no nível dos

conglomerados. Com isso, pode ocorrer o abatimento de blocos de quartzitos monomíticos por alívio de tensão, o que contribui para ampliação dos condutos. Portanto, esse conjunto de processos pode explicar as razões pelas quais as cavidades que atingem os níveis de quartzitos monomíticos possuem os volumes mais expressivos na área de estudo.

As estruturas geológicas também são variáveis que favorecem o desenvolvimento de feições cársticas. Afinal, além de facilitar a infiltração e percolação hídrica no maciço, observa-se que a direção de alguns dos condutos é concordante com planos de fratura e de acamamento. Além disso, registra-se a ocorrência de perfis transversais elípticos, triangulares e retangulares, que podem ser influenciados principalmente pelos planos de acamamento e, por fim há condutos suavemente inclinados concordantes com o mergulho dos planos de acamamento (20 a 30°).

A configuração geomorfológica local também favorece o desenvolvimento de feições cársticas, uma vez que se observa que as áreas de vertentes côncavas e escarpas dissecadas são as principais unidades geomorfológicas de ocorrência de cavidades e demais feições cársticas. Esse fator é importante porque a própria inclinação da vertente, associada ao gradiente de relevo permite a circulação de água e sua saída do maciço, o que permite a formação das cavidades. O gradiente de relevo apresenta concordância com a maioria dos desníveis das cavidades e, portanto, é um fator que contribui para a formação das cavidades. Salienta-se que a relação concordante entre a inclinação da vertente e das cavidades, associada à disponibilidade hídrica local favorece a remobilização mecânica dos grãos alterados através do *piping*. A remobilização através do *piping*, segundo Martini (1979, 1984), constitui uma das etapas do processo de formação de feições cársticas em rochas siliciclásticas.

Ressalta-se que todas as feições identificadas só ocorreram também em função dos processos hidrológicos no sistema através de fluxo fluvial, pluvial e hidrogeológico. Afinal, a água participa de todo o processo de desenvolvimento das cavidades, incluindo hidrólise, dissolução, lixiviação e remobilização dos grãos alterados. Martini (1979) e Gálan (1991) reforçam essa informação ao afirmar que a remoção da sílica é eficiente onde a circulação da água é significativa. Todavia, os resultados obtidos não devem ser observados isoladamente e podem ser aprofundados com dados sobre a denundação local e as taxas de lixiviação de solos originados de quartzitos da Formação Sopa-Brumadinho.

O GRAF. 11.1 mostra a concentração de carga catiônica dissolvida e sólidos totais dissolvidos (TDS) nas estações úmida e seca e a média aritmética na bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, próximo à área de estudo. O GRÁF. 11.1 foi elaborado conforme dados

processados por Barreto (2012) e observa-se que os cátions que apresentam as maiores taxas de dissolução são, respectivamente, Si, Na e Ca.

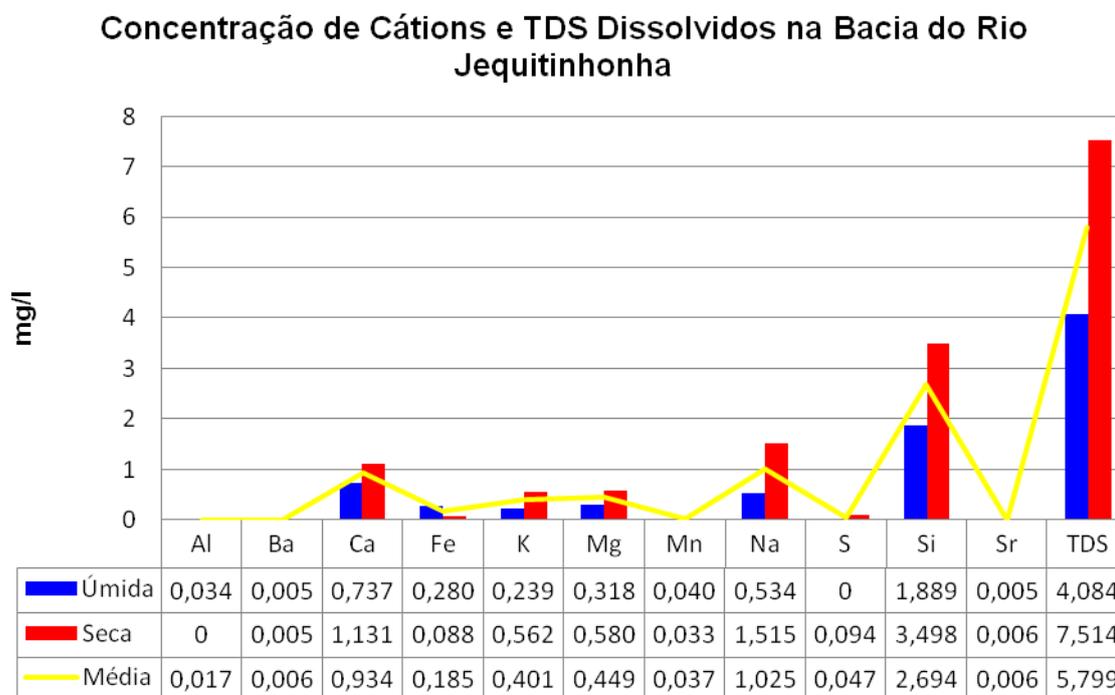


GRAFICO 11.1 – Concentração de Cátions e TDS na bacia do Rio Jequitinhonha

Fonte: Barreto (2012)

Org: Souza, F. C. R. (2013)

Os dados da taxas de cátions dissolvidos permitem o levantamento de dois pontos principais: a) os índices de Si e b) a concentração de Ca dissolvidos. Destaca-se que apesar dos minerais compostos por Si serem considerados um dos mais resistentes à dissolução, verifica-se que os índices de dissolução do Si são os maiores. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de conhecer melhor os mecanismos de dissolução da Si e reforça a possibilidade de participação desse processo no desenvolvimento de feições cársticas na área de estudo. A concentração de Ca dissolvidos também merece destaque. Para isso verifica-se a composição litológica da área amostrada por Barreto (2012), conforme mostra o QUADRO 11.2. Constata-se que a área é composta predominantemente (82,4%) por rochas que possuem especialmente Si na sua composição e há ausência de rochas carbonáticas.

QUADRO 11.2

Contexto litológico da Bacia do Rio Jequitinhonha

Substrato Litológico	Concentração (%)
Quartzito	82,3
Xisto e filito	11,1
Metabásica	5,8
Granito-gnaiss	0,8
Carbonáticas	0,0

Fonte: Barreto (2012). Org: Souza, F. C. R. (2013)

A partir da correlação desses dados com os resultados obtidos na petrografia das lâminas delgadas e com as informações de composição dos depósitos químicos é possível ampliar as interpretações. Os dados EDS linha dos espeleotemas registram concentrações elevadas de Si, porém em depósitos químicos, principalmente na Gruta Extração, a concentração de Ca reprecipitado é o que apresenta qualitativamente os maiores índices. Nesse sentido, observa-se que o feldspato identificado nas lâminas petrográficas provavelmente equivale a feldspato cálcico, cuja maior concentração ocorre nos ortoconglomerados de matriz sericítica (36%). Essa camada estratigráfica, por sua vez, foi identificada no interior da Gruta Extração, o que justifica os dados verificados na composição química dos espeleotemas, principalmente nesta cavidade. Assim, esses dados reforçam a hipótese de que a dissolução de feldspatos ocorre inicialmente, enfraquece as ligações geoquímicas, facilita a ação química da água e permite a formação dos primeiros condutos que dão origem às cavidades. Esse fato também justifica a projeção horizontal, área e volume das maiores cavidades serem aquelas que apresentam contato entre quartzitos monomíticos e conglomerados, como é possível verificar no GRÁF. 11.2.

Relação entre dimensões morfométricas das cavidades
e o contexto litológico

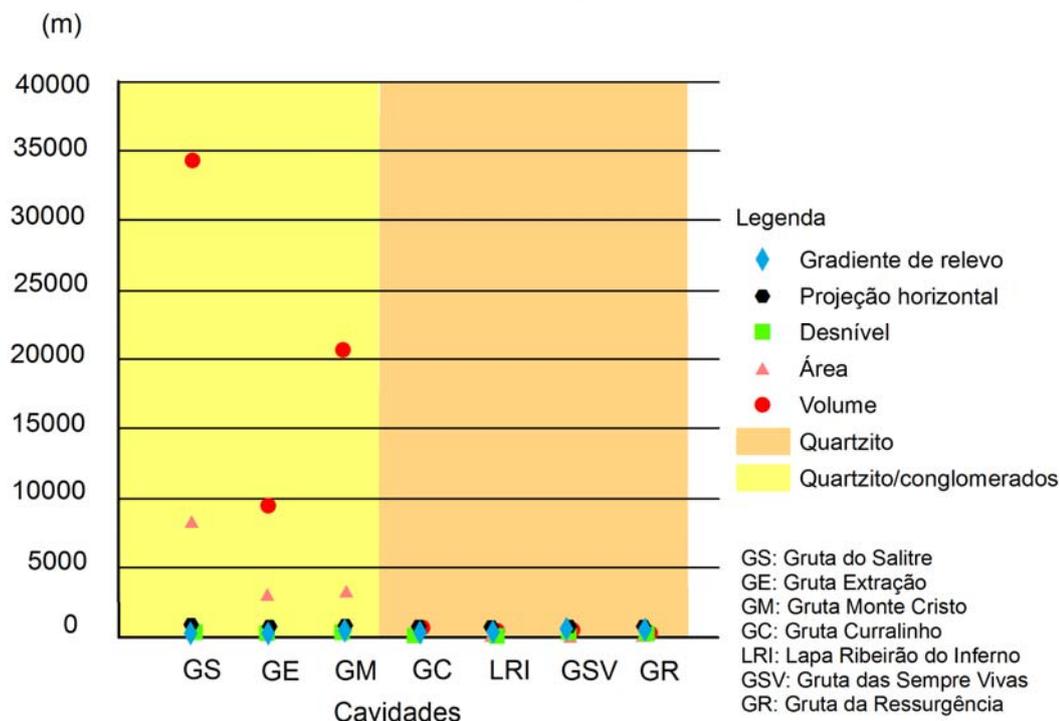


GRÁFICO 11.2 - Relação entre a dimensão morfométrica das cavidades e o contexto litológico

Registra-se que além da dissolução, é fundamental a perda geoquímica e, segundo Martini (1984), o transporte mecânico também, para permitir a abertura dos condutos e evitar a recristalização dos minerais. Por isso, os dados de taxas de lixiviação de solos originados de quartzitos da Formação Sopa-Brumadinho, obtidas por Santos (2012), auxiliam na interpretação geomorfológica local. Esses dados são relevantes porque permite ampliar as análises sobre feições cársticas encobertas por NEOSSOLOS na área pesquisada e compreender as propriedades químicas da água que penetra o maciço quartzítico. Santos (2012) realiza cinco ensaios de lixiviação com água destilada e dois ensaios em solução com pH 9 nas amostras dos horizontes A e C de solos originados de rochas da Formação Sopa Brumadinho. Os resultados apontados por Santos (2012) demonstram que as maiores taxas de lixiviação no horizonte A são de Na, SiO₂ e Ca e as taxas de lixiviação de SiO₂ aumentam consideravelmente quando atacadas por solução de pH 9 (GRÁF. 11.3A). No horizonte C, por sua vez, verifica-se que os maiores índices de lixiviação são, respectivamente, de Ca, Na e SiO₂ e em solução de pH 9 observa-se o aumento na perda de SiO₂ e Ca (GRÁF. 11.3B). Ao considerar as taxas de lixiviação total com água destilada, observa-se que os maiores índices de elementos lixiviados são de Na, Ca e SiO₂ (GRÁF. 11.3C).

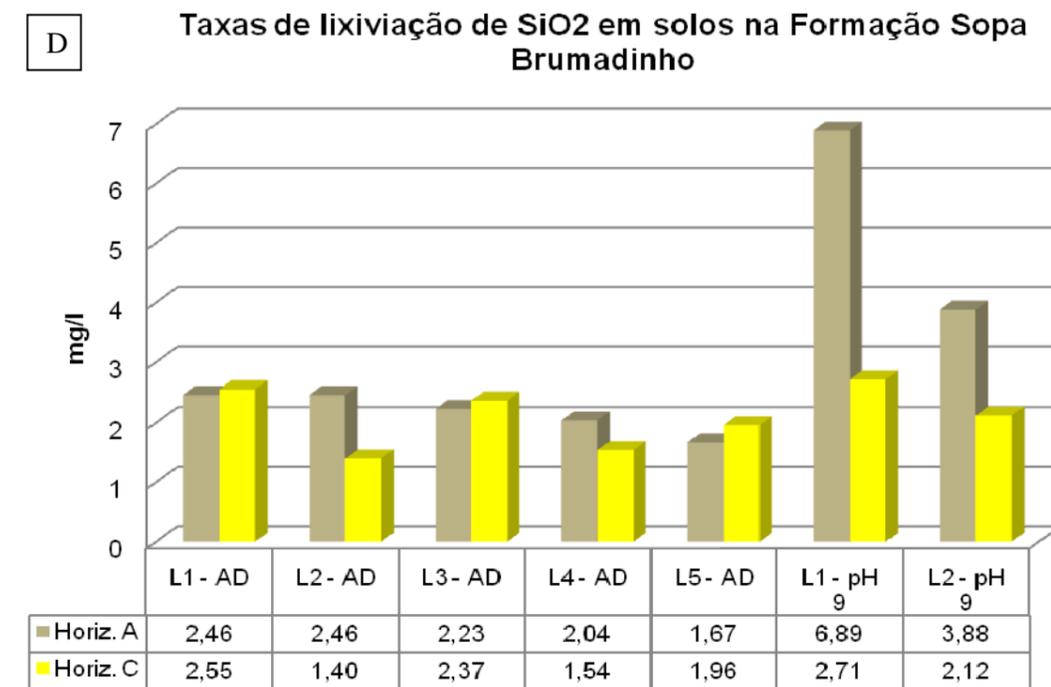
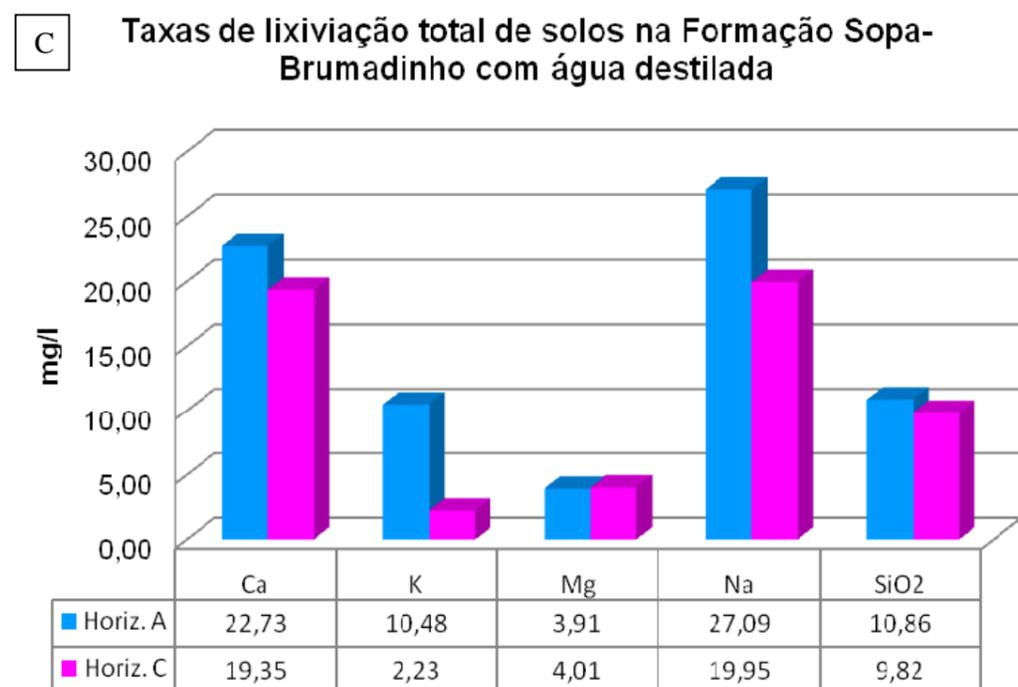
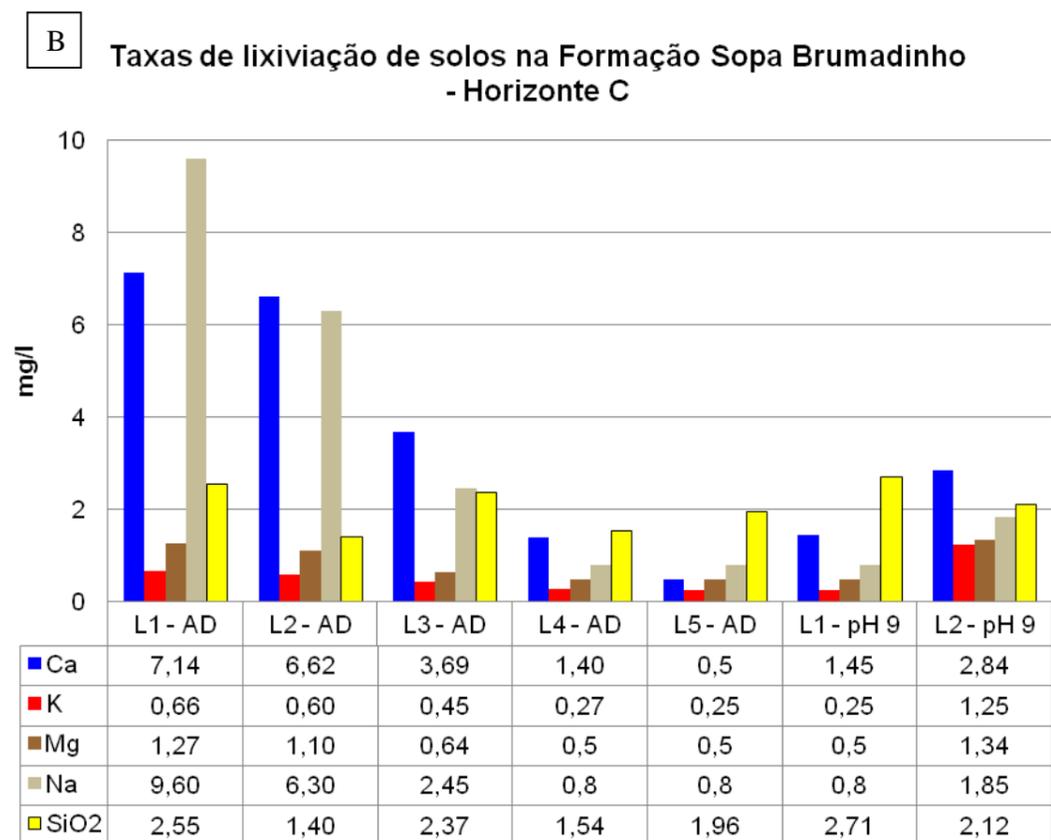
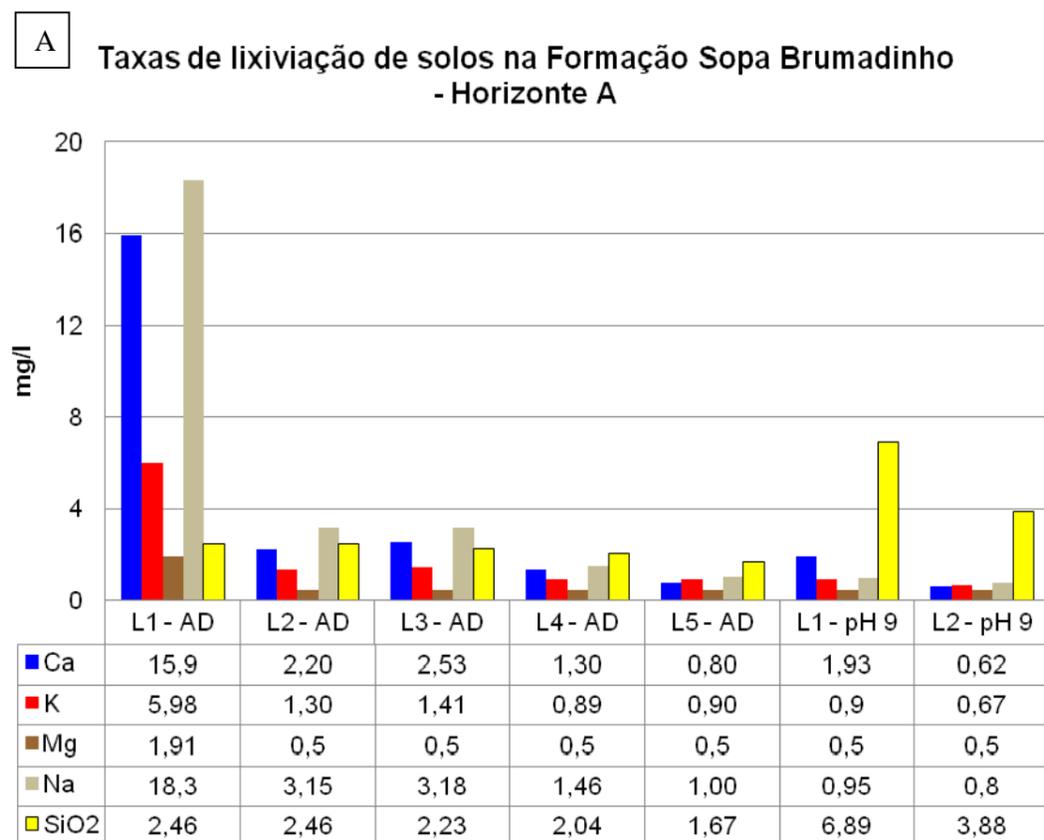


GRÁFICO 11.3 – Taxas de lixiviação de solos originados de rochas da Formação Sopa-Brumadinho. A) Horizonte A; B) Horizonte C; C) Lixiviação total com água destilada; D) Lixiviação de SiO₂.
 Fonte: Santos (2012)
 Org: Souza, F. C. R. (2013)

As taxas de lixiviação de solos originados de rochas da Formação Sopa-Brumadinho (SANTOS, 2012) corroboram com as taxas catiônicas dissolvidas apresentadas por Barreto (2012). Nesse sentido, enfatiza-se a presença de Ca em solos originados de rochas da Formação Sopa-Brumadinho, especialmente no horizonte C. Além disso, vários dados apontam que apesar do SiO₂ ser considerado resistente, verifica-se taxas consideráveis de perdas desse mineral. Considerando os índices de lixiviação de SiO₂, constata-se que, em água destilada, há alternâncias das maiores perdas lixiviadas nos horizontes A e C, sendo que o predomínio geral é no horizonte C. Já com a adição de solução pH 9, observa-se que os maiores índices do lixiviado são no horizonte A (GRÁF. 11.3D).

Esses dados comprovam os princípios teóricos químicos, segundo os quais em condições de pH 9, os índices de SiO₂ dissolvidos e lixiviados elevam. Destaca-se, porém, que em condições ambientais de clima tropical úmido provavelmente não há ocorrência natural de pH 9. Por isso, observa-se que provavelmente as perdas químicas de SiO₂ tendem a serem maiores no horizonte C em relação ao A, o que pode estar associado à formação das cavidades.

A interpretação dos dados secundários e os resultados obtidos permitem levantar a hipótese de que os teores de sílica dissolvidos e lixiviados são provenientes do Si presente na estrutura dos feldspatos e micas e também da sílica amorfa. Essa hipótese é reforçada pelas imagens microscópicas e análise EDS dos depósitos químicos. Os dados químicos demonstram concentrações de Si, porém na imagem microscópica verifica-se que não corresponde a nenhuma estrutura cristalina de sílica. As afirmações de Martini (1979, 1984) e Urbani (1986b) reforçam a hipótese apresentada. Segundo os autores (MARTINI, 1979, 1984; URBANI, 1986b) a solubilidade da sílica amorfa é uniforme com condições ambientais de pH entre 3 e 7, sendo essa a condição hidrogeniônica comum de regiões tropicais úmidas, como a área de estudo.

A análise das variáveis⁵¹ interpretadas ao longo deste trabalho permite verificar a relação entre elas e a elaboração da hipótese geral de formação das feições cársticas na região SE de Diamantina, conforme registra a FIG. 11.1. Estima-se que a água infiltrava pelas falhas e fraturas da rocha, penetrava os maciços e também escoava superficialmente aproveitando a declividade local do relevo. Ao penetrar o maciço a água reage com os minerais que compõem a rocha e dissolve os elementos químicos presentes (Ca > K > Na > Si). Esse

⁵¹ As variáveis interpretadas são: composição litológica, organização estratigráfica, direção e mergulho dos planos de fratura, foliação, xistosidade e acamamento, compartimentação geomorfológica e gradiente de relevo associadas à distribuição espacial e extensão de cavidades e feições exocársticas e interrelacionados com dados secundários de taxas de lixiviação (SANTOS, 2012), de cátions dissolvidos (BARRETO, 2012).

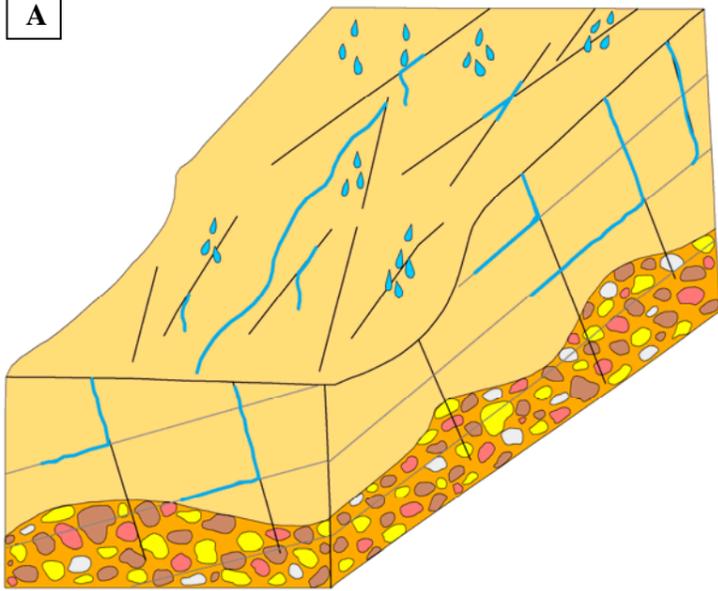
processo ocorre preferencialmente ao longo dos planos de xistosidade, foliação e acamamento da rocha e originou os protocondutos ou os primeiros espaços vazios que deram origem às cavidades. Em ambiente superficial os princípios de reação química foram os mesmos e acompanhava também as descontinuidades litológicas (falhas, fraturas, xistosidade, foliação e acamamento) e deu origem às feições exocársticas.

No ambiente natural subterrâneo após esse processo inicial, houve a formação de material residual alterado (areia). Esse material residual foi removido pelo fluxo hídrico e a topografia local favoreceu esse processo. Assim, nas áreas com maior gradiente de relevo, o fluxo hídrico tende a ter maior velocidade e permitir a remobilização dos grãos alterados. Além da remoção dos grãos alterados, processos de abatimento por alívio de tensão contribuem para a ampliação volumétrica dos condutos.

Quando o fluxo hídrico atinge as fácies litológicas de ortoconglomerados e paraconglomerados o processo de dissolução tende a ser mais intenso, devido à composição química e textural dessa fácies, o que contribui para desagregação dos minerais e a ampliação dos condutos existentes. Assim, nas localidades onde o fluxo atingiu apenas a fácies de quartzitos monomíticos as cavidades tiveram projeção horizontal menor (9,6 a 40,5m) e nos locais onde atingiu as fácies de conglomerados a projeção horizontal ampliou (216 a 593,5m). Concomitantemente, os processos de remobilização e abatimento seguiram os mesmos procedimentos apresentados anteriormente.

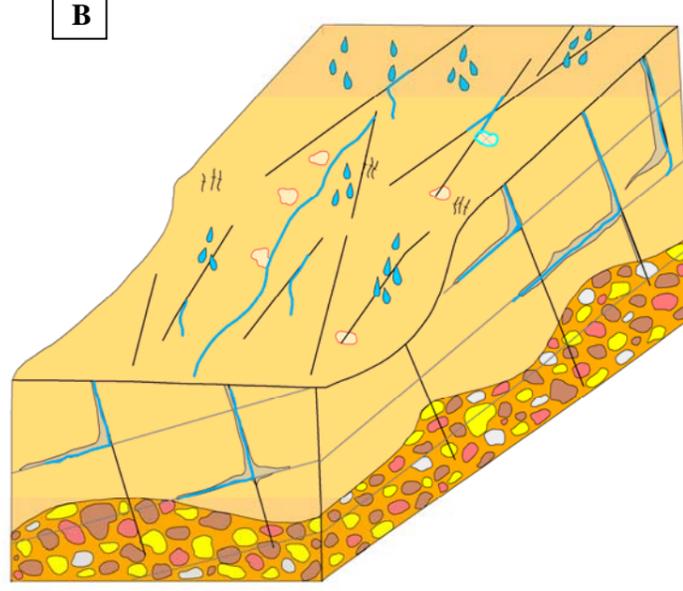
Barreto (2012) investiga as taxas de rebaixamento da SdEM através do método de datação ^{10}Be e constata que o relevo na área de estudo e suas proximidades tiveram a taxa de rebaixamento de 4,84m/Ma (BARRETO, 2012). Ou seja, pode-se calcular através da extrapolação destes dados que nos últimos 10Ma o relevo local rebaixou 48,4m. Se considerarmos a maioria das cavidades possui as menores PHs, levanta-se a hipótese de que com o rebaixamento de 48,4m do relevo nos últimos 10Ma, algumas cavidades foram naturalmente suprimidas. Essa hipótese é reforçada devido à presença de arcos na superfície que são indicativos da presença de cavidades no passado geológico.

A



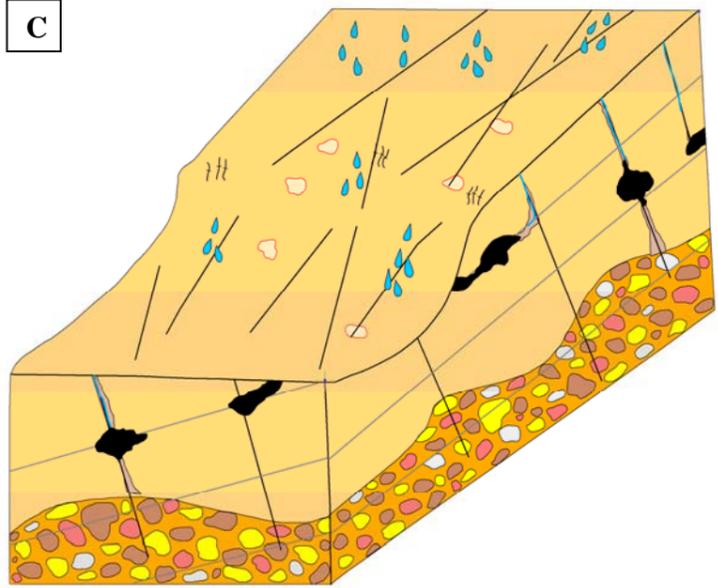
- Infiltração de água no maciço através das descontinuidades
- Reação da água com os minerais

B



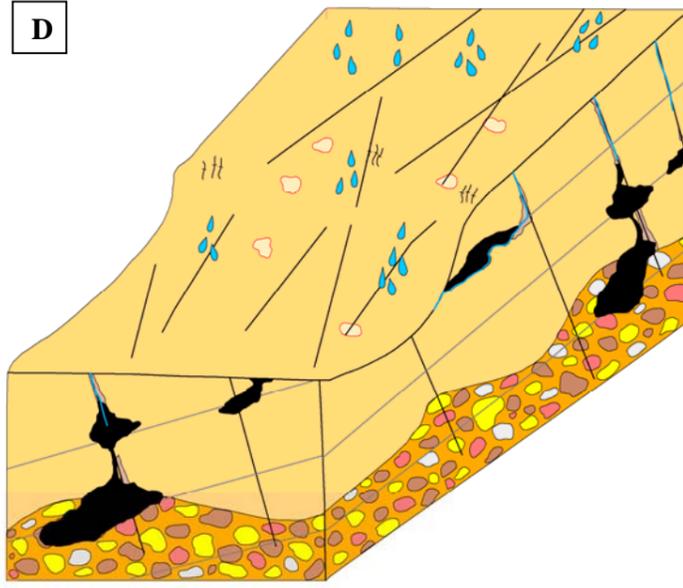
- Dissolução
- Formação de material residual alterado
- Formação de feições exocársticas

C



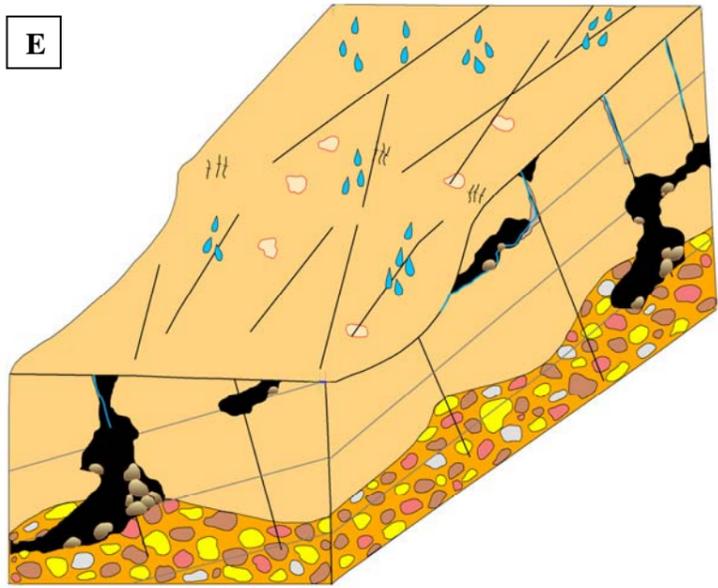
- Formação de condutos, principalmente nas fácies de quartzitos monomíticos
- Infiltração de água nos conglomerados

D



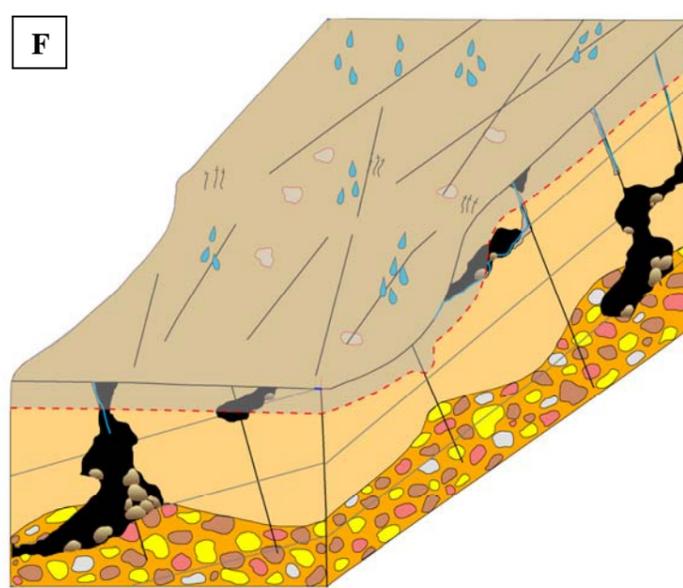
- Ampliação dos condutos
- Dissolução e formação de condutos
- *Piping*

E



- Abatimentos por alívio de tensão
- Ampliação dos condutos

F



- Rebaixamento do relevo
- Supressão natural de algumas feições cársticas

Convenções

- Drenagens
- - - - - Nível rebaixamento
- Rebaixamento do relevo
- Material residual alterado
- Blocos abatidos

Feições cársticas

- Karren
- Kamenitzas
- Cavidades

Principais linhas estruturais

- Fraturas
- Planos de acamamento

Composição estratigráfica

- Quartzitos monomíticos
- Matriz dos conglomerados
- Arcabouço dos conglomerados

FIGURA 11.1 – Hipótese das etapas de formação das feições cársticas na região SE de Diamantina

12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido permite apresentar as seguintes considerações:

1. Em termos gerais, constata-se que a área de estudo registra a presença de feições exocársticas e hidrológicas, além de apresentar potencial de ocorrências superior ao mapeado. Neste contexto, este trabalho contribui cientificamente a partir da caracterização geral e horizontalizada das feições cársticas identificadas.
2. A ocorrência das feições exocársticas pode estar associada ao contexto estratigráfico local e superficial, que apresenta maior proporção de quartzitos monomíticos.
3. O adensamento das atividades de prospecção pode ampliar o número de feições hidrológicas que até então foram mapeadas apenas na porção central da área pesquisada. Entretanto, a densidade de ocorrência destas feições é inferior ao identificado em áreas de litologia carbonática, devido à composição química e mineralógica destas rochas favorecerem a maior rapidez na dissolução do Ca em detrimento ao Si.
4. A identificação destas feições hidrológicas e exocársticas evidencia que a área investigada apresenta características específicas e requer estudos aprofundados direcionados a interpretar os processos diretamente envolvidos na sua elaboração.
5. Em relação ao levantamento das kamenitzas constata-se que elas são geoformas recorrentes na área investigada. Já os dados estatísticos registram que em geral, a menor proporção das kamenitzas apresenta-se como as mais profundas (8%), com eixo maior mais extenso (4%) e eixo menor mais extenso (7%). Assim, em geral, as kamenitzas possuem distribuição amostral homogênea em relação a estes parâmetros no intervalo de extensões que variam do valor menor ao segundo quartil, ou seja, elas são predominantemente pequenas ou médias. O desvio padrão registra que a maioria das kamenitzas possui valores de profundidade e extensão do eixo menor concentrados próximo ao valor médio, enquanto que, embora a diferença seja pequena, a maioria das kamenitzas apresenta dispersão em relação à extensão do eixo maior de desenvolvimento destas feições. Neste caso, esta dispersão é predominantemente associada a valores menores que o médio.
6. A interpretação da estatística descritiva das kamenitzas também demonstra que há dois tipos morfológicos de kamenitzas na área de estudo: a) as profundas, arredondadas e de dimensões menores e b) as rasas, alongadas ou ovais e de dimensões maiores. As feições desenvolvidas em áreas entre 900 e 999m de altitude apresentam morfologia

predominantemente arredondada e também são as amostras mais profundas na área. Já as feições desenvolvidas em áreas entre 1100 e 1199m apresentam, em geral, morfologia alongada e rasa e são as amostras mais extensas na área investigada.

7. Em termos espaciais percebe-se que as kamenitzas profundas, arredondadas e de dimensões menores localizam-se predominantemente na parte sul da área de estudo. Essas características podem estar associadas ao contexto geomorfológico local, que é marcado por geformas de dissecação e relevo íngreme ou suavemente inclinado. Afinal, em áreas com essas características geomorfológicas, a água pluvial tende a incidir e ocorre o processo de dissolução da rocha, ocasionando a formação das kamenitzas. Porém, na escala temporal, o processo de dissolução tende a contribuir para o desenvolvimento mais vertical da geoforma em detrimento do lateral. Já as feições rasas, alongadas e de dimensões maiores estão situadas principalmente na parte norte da região SE de Diamantina, que apresenta características geomorfológicas suavizadas localmente. Em áreas de relevo suavizado a água tende a atuar no processo de dissolução da rocha e a expansão desta geoforma tende a ser lateral. Isso favoreceu o desenvolvimento de kamenitzas rasas, alongadas e de dimensões maiores.
8. Registra-se que a semelhança entre essas kamenitzas é que ambas as tipologias [a) as profundas, arredondadas e de dimensões menores e b) as rasas, alongadas ou ovais e de dimensões maiores] apresentam cristas suaves e ocorrem diretamente sobre a rocha, não estão associadas à cobertura pedológica ou vegetal.
9. Conforme os critérios utilizados para caracterização e descrição das cavidades, destaca-se a ocorrência de processos hidrológicos em todas as cavidades. Esses processos ocorrem na forma de gotejamento, condensação e drenagens perenes e intermitentes. Os depósitos clásticos ocorrem na forma de areia, silte, seixos e matacão distribuídos ao longo dos condutos. Alguns depósitos clásticos estratificados também são registrados em quatro cavidades (Gruta do Salitre, Gruta Monte Cristo, Gruta Extração e Gruta Curralinho). Os principais depósitos orgânicos verificados nas cavidades são folhas e guano. E, por fim, os depósitos químicos estão presentes em todas as cavidades e ocorrem, especialmente, na forma de coralóides, crostas e escorrimentos.
10. As cavidades da área investigada são predominantemente horizontalizadas. A morfologia dos condutos das cavidades estudadas apresenta morfologia de teto e piso suavemente inclinados e são predominantemente concordantes à direção de caimento da vertente. Em termos gerais, as galerias e salões possuem morfologias retangulares,

triangulares e elípticas horizontais. Essas características morfológicas de teto, piso e galeria são concordantes com o observado por Corrêa Neto *et al.* (1997), Silva (2004) e Fabri (2011) em cavidades em quartzito desenvolvidas na Serra do Ibitipoca e na região de Itambé do Mato Dentro.

11. Na região SE de Diamantina as cavidades possuem de 9,6 a 593,5m de projeção horizontal e no território nacional as cavidades topografadas em rochas siliciclásticas variam de 8 a 4700m de projeção horizontal. A correlação percentual deste parâmetro para as cavidades desenvolvidas em rochas siliciclásticas no Brasil e na região SE de Diamantina, demonstra que em ambas as áreas, a maioria das cavidades possui de 5 a 100m de projeção horizontal. Esses dados demonstram que, em geral, a maioria das cavidades apresenta projeção horizontal pequena, mas algumas podem atingir dimensões quilométricas, principalmente se localizadas em áreas íngremes, conforme observado durante o levantamento do parâmetro investigado. Registra-se que apesar da quantidade de cavidades identificadas em quartzito representar em média 1% do potencial existente para este tipo de rocha (AULER; PILÓ, 2011), o número de cavidades topografadas e publicadas é ainda menor. A quantidade de cavidades topografadas representa, em média, 2,5% das cavidades identificadas em rochas siliciclásticas no Brasil.
12. Os padrões planimétricos das cavidades da área de estudo não se encaixam perfeitamente na classificação de Palmer (2007). Esse aspecto foi identificado por outros autores que investigaram cavidades em quartzito (FABRI, 2011). Com isso, percebe-se a importância de debater e, se necessário, estabelecer a classificação específica de padrão planimétrico para as cavidades em rochas siliciclásticas. Afinal, conforme Martini (1984), os mecanismos envolvidos na formação destes tipos de cavidades são específicos, envolvem dissolução e *piping*.
13. Destaca-se a presença de depósitos clásticos estratificados em algumas cavidades (Gruta do Salitre, Gruta Monte Cristo, Gruta Extração e Gruta Curralinho) com estratos plano paralelos compostos predominantemente por materiais de textura arenosa ou arenoso siltosa, intercalado em algumas ocasiões com camadas com seixos. Essas características levam à hipótese de que alguns condutos das cavidades foram preenchidos por material detrítico associado a fluxo fluvial, predominantemente lento.
14. Os trabalhos qualitativos com uso de MEV e EDS linha nas amostras de depósitos químicos na área de estudo apontam variedades de elementos químicos. Essas

características reforçam a hipótese que a presença de poliminerais na rocha matriz contribui para a formação de cavidades e depósitos químicos.

15. Apesar da ocorrência de depósitos químicos não ser o processo único que comprova a dissolução durante a gênese das cavidades; pode-se considerar que a dissolução contribuiu em alguma etapa de formação das cavidades. Além disso, as imagens dos depósitos químicos indicam variações na concentração de minerais, e indicam prováveis oscilações nas condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento dos espeleotemas.
16. Registra a concentração e distribuição qualitativamente alta nos teores de Ca nas deposições químicas. Porém, como as imagens microquímicas não evidenciam a presença de calcita nas amostras, as taxas de Ca podem estar associadas à presença de feldspato cálcico na rocha matriz. A presença de C nas amostras está associada a metalização realizada durante a preparação da amostra com esse material e as concentrações de P estão associadas à presença de matéria orgânica. Já os teores de Si e O, que nem sempre estão associados à presença de quartzo conforme verificado nas imagens microquímicas. Com isso, registra-se que provavelmente esse mineral equivale à sílica amorfa, além de ser proveniente também de elementos presentes na estrutura atômica da mica e feldspato.
17. A relação entre litoestrutura, geomorfologia, clima e hidrografia podem ter contribuído para a formação das cavidades e feições exocársticas na região SE de Diamantina. A composição litológica demonstra não ser o principal fator responsável pela formação de feições cársticas na área de estudo. Afinal, as feições cársticas não podem ser classificadas conforme o tipo litológico e os quartzitos da área de estudo apresentam baixo grau de metamorfismo, que inibe o processo de dissolução da rocha. Entretanto, admite-se que a composição polimineralógica e politextural favorece o desenvolvimento de feições cársticas na localidade investigada.
18. Os fatores estruturais associados ao desenvolvimento das cavidades na região SE de Diamantina são, primeiramente, os planos de fratura, seguido do mergulho do acamamento e planos de foliação. Afinal, a direção preferencial dos condutos (NE-SW) é concordante principalmente com a direção dos planos de fratura (NE-SW) e posteriormente com a direção e mergulho dos planos de acamamento (NW-SE). Assim, a interação entre esses tipos de lineamentos estruturais contribuem com a formação e morfologia planimétrica das cavidades existentes.

19. A geomorfologia local contribui para o desenvolvimento de cavidades na área de estudo, pois a ocorrência das cavidades é concordante com a inclinação da vertente. Além disso, há, predominantemente, relação positiva entre gradiente do relevo local e o desnível das cavidades. Destaca-se também que a presença de escarpas dissecadas são áreas favoráveis à ocorrência de cavidades, o que ocorre porque contribui para a remobilização mecânica dos grãos alterados.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA ABREU, P. A. **A evolução geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia). Freiburg (Alemanha): Universidade de Freiburg. 1993. 150p.

ALMEIDA ABREU, P. A.; PFLUG, R. **The geodynamic evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil**. ZBL Geology. Teil I. 1994.

ALMEIDA ABREU, P. A. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): o rifte, a bacia e o orógeno. **Geonomos**. 3; 1. 1995, p.1-18.

ALMEIDA ABREU, P. A.; RENGER, F. E. Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, 32, 1. 2002, p.1-14.

ALVARENGA, C. J. S. Comportamento Estratigráfico da Formação Sopa-Brumadinho no Distrito Diamantífero de Extração (Diamantina-MG). CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Salvador. **Anais...** Salvador: SBG. 1982.

ANDRADES FILHO, C. O.; FONSECA, L. M. G. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. **Anais ...** INPE. Natal. 2009. p. 3151-3158.

AUBRECHT, R.; LÁNCZOS, T.; GREGOR, M.; SCHLÖGL, J.; SMÍDA, B.; LISCÁK, P.; BREWER-CARÍAS, Ch.; VLCEK. Sandstone caves on Venezuelan tepuis: return to pseudokarst? **Geomorphology**, n.132, p. 351-365, 2011.

ANDREYCHOUK, V.; TRAVASSOS, L. E. P.; BARBOSA, E. P. As cavernas como objetos do turismo religioso em diferentes crenças religiosas: alguns exemplos mundiais. **O Carste**, v. 22, n. 2, p.48-64, 2010.

AUBRECHT, R.; LÁNCZOS, T.; SMÍDA, B.; BREWER-CARÍAS, C.; MAYORAL, F.; SCHLÖGL, J.; AUDY, M.; VLCEK, L.; KOVÁCIK, L.; GREGOR, M. Venezuela Sandstone Caves: a new view on their Genesis, hydrogeology and speleothems. **Geologia Croatica**. v. 61. n. 2,3. 2008. p.345-362.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia: características e processos associados. **Geonomos**. v.14. n.1-2. Belo Horizonte. 2006, p. 75-86.

AULER, A. S. Quartzite Caves of South America. In: GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York, London: Taylor and Francis Group. 2004. p. 611-613.

AULER, A. S.; ZOGBI, L. **Espeleologia**: noções básicas. São Paulo: Redespeleo Brasil. 2005.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Introdução à Espeleologia. INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS - CECAV. **Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília. 2011a.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Geoespeleologia. INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS - CECAV. **Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília. 2011b.

AZEVEDO, A. A.; ARAÚJO, H. R. Processo de estruturação da gestão de uso público da Gruta do Salitre, Diamantina, Minas Gerais. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31. **Anais...** Ponta Grossa: Sociedade Brasileira de Espeleologia. Ponta Grossa. 2011. p.201-208.

BARRETO, H. N. **Investigação da Influência dos Processos Denudacionais na Evolução do relevo da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais – Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia). DEGEO/UFOP. Ouro Preto. 2012.

BARATA, R. A.; APOLINÁRIO, E. C.; CERQUEIRA, R. F. Flebotomíneos (Diptera, Psychodidae) de Cavernas Quartzíticas na Cadeia do Espinhaço no Estado de Minas Gerais, Brasil. CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL. 10. São Lourenço: SEB. **Anais...** São Lourenço. 2011. p.1-2.

BENNET, P. C.; MELCER, M. E.; SIEGER, D. I.; HASSET, J. P. The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25°. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 52. 1998. p.1521-1530.

BITTENCOURT ROSA, D. **Les Gisements D’Opales Nobles de la Region de Pedro II Dans L’Etat de Piauí (Region Nord – Est du Bresil**. L’Institut National Polytechnique de Lorraine. Tese de Doutorado. 1988. 230p.

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

BRAGA, P. L. M.; SÁ, F. S.; GRADANUCCI, J. P. L. Ecologia Populacional de Aranhas Troglófilas *Trechona* sp. (Mygalomorphae, Dipluridae) na Gruta Monte Cristo, Diamantina, Minas Gerais. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA. 31. Ponta Grossa: SBE. **Anais...** Ponta Grossa. 2011a. p. 501-505.

BRAGA, P. L. M.; SÁ, F. S.; GRADANUCCI, J. P. L. Aranhas Troglófilas do Gênero *Trechona* (Araneae, Mygalomorphae, Dipluridae) na Gruta Monte Cristo, Diamantina, Minas Gerais. CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL. 10. São Lourenço: SEB. **Anais...** São Lourenço. 2011b. p.1-2.

BRASIL. **Decreto nº 6640, de 07 de Novembro de 2008.** Presidência da República. Brasília. 2008.

BRICHTA, A.; PATERNOSTER, K.; SCHÖLL, W, U.; TURINSKY, F. Die Gruta do Salitre bei Diamantina, Minas Gerais, Brasilien, Kein,, Einsturzloch". **Zeitschrift für Geomorphologie.** n.24. v. 2. Berlin: Stuttgart. p.236-242, Juni, 1980.

BUCHMANN, F. S.; LOPES, R. P.; CARON, F. Icnofósseis (Paleotocas e Crotovinas) atribuídos a mamíferos extintos no Sudeste e Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia.** v.12. n.3. Sociedade Brasileira de Paleontologia. 2009. p.247-256.

CARTELLE, C. **Tempo Passado.** Mamíferos fósseis em Minas Gerais. Belo Horizonte: Palco. 1994, 132p.

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS – CECAV. **Base de Dados:** cavidades do Brasil. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav>

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS – CECAV. **Projeto Inventário Anual do Patrimônio Espeleológico Nacional.** 2011. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav>

CIOCCALE, M. A.; PASQUINI, A. I.; DEPETRIS, P. J. Hallazgo de Espeleotemas Silíceas em Rocas Graníticas Del Batolito de Achala, Sierras Pampeanas de Córdoba. **Revista de La Asociación Geológica Argentina,** n. 63, v. 3, p. 413-420, 2008.

CHULA, A. M. D.; KNAUER, L. G.; ALMEIDA ABREU, P. A. Considerações sobre a geologia da região de Desembargador Otoni – Planalto de Minas, Diamantina (MG). SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 8. Diamantina, **Anais...** Diamantina. 1995.

CORDANI, U. G.; IYER, S.S.; TAYLOR, P. N.; KAWAHITA, K.; SATO, K.; McREATH, I. Pb-Pb, Rb-Sr and K-Ar systematic of the Lagoa Real uranium province (south-central Bahia, Brazil) and the Espinhaço Cycle (ca 1.5 -1.0 Ga). **Journal South America Earth Science**, 5. 1992. p. 33-46.

CORRÊA NETO, A. V.; ANÍSIO, L. C. C.; BRANDÃO, C. P.; CINTRA, H. P. Gruta das Bromélias (MG 042), município de Lima Duarte, MG: uma das maiores cavernas em quartzito do mundo. *Espeleotema*. 18. 1995. p. 1-12.

CORRÊA NETO, A. V.; BAPTISTA FILHO, J. Espeleogênese em Quartzitos da Serra do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 20. 1997, p.75-87.

CORRÊA NETO, A. V. Speleogenesis in Quartzite in Southeastern Minas Gerais, Brazil. **Speleogenesis**. v.1. 2000. p. 452-457.

CVIJIC, J. **La Géographie dès Terrains Calcaires. Monographies**. Académie Serbe des Sciences et del Arts. Beograd. 1960.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL/ CIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – DNPM/ CPRM. Fotografias Aéreas 382, 383, 384 e 385. In: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL/ CIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – DNPM/ CPRM. **Projeto Serra do Espinhaço**. Obra 12. Folha 2423. Faixa 8, escala 1:25.000. 1979.

DEVÈS, G.; PERROUX, A.; BACQUART, T.; PLAISIR, C.; ROSE, J.; JAILET, S.; GHALEB, B.; ORTEGA, R.; MAIRE, R. Chemical Element Imaging for Speleothem Geochemistry: application to uranium-bearing corallite with aragonite diagenesis to opal (Eastern Siberia, Russia). **Chemical Geology**, v. 294, n.295, p. 190-202, 2012.

DINIZ, A. D.; OLIVEIRA, C. V.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Relações Solos – Superfícies Geomórficas na Porção Norte da Bacia do Ribeirão Chiqueiro – Gouveia, MG. **Geonomos**. v.13. n. 1,2. 2005. p. 19-27.

DREVER, J. I.; STILINGS, L. J. The role of organic acids in mineral weathering. **Colloids and Surfaces**. v.120.1996. p.167-181.

DREYBRODT, W. **Processes in Karst Systems: physics, chemistry and geology**. Springer Verlag. New York. 1998.

DUSSIN, I. A.; UHLEIN, A.; DUSSIN, T. M. **Geologia da faixa móvel Espinhaço em sua porção meridional, MG.** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. 33. v. 7. Anais... 1984.

DUSSIN, I. A.; DUSSIN, T. M. Supergrupo Espinhaço: Modelo de Evolução Geodinâmica. **Geonomos**. 3; 11995, p. 19-26.

FABRI, F. P. **Estudo das Cavernas Quartzíticas da Região de Itambé do Mato Dentro, Serra do Espinhaço Meridional, MG.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Belo Horizonte: IGC/UFMG. 2011. 179p.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology.** Ed. Rev. England: John Wiley & Sons Ltd. 2007. 562p.

FOGAÇA, A. C. C. **Geologia da Folha Diamantina.** In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. & SOARES-FILHO, B. S. (coordenadores e editores). **PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos).** Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. 1997. p. 1575-1665.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais.** Base planimétrica parcialmente ajustada, elaborada a partir do Mapa Geográfico do Instituto de Geociências Aplicadas – IGA. Escala 1:500.000. 1980.

GALÁN, C. Disolución y genesis del karst en rocas carbonáticas y rocas síliceas: um estudio comparado. **Munibe**. v.43. 1991. p.43-72.

GAMS, I. The polje: The problem of definition. **Zeitschrift für Geomorphologie**. n.22. 1978. p. 170-181.

GENSER, H.; MEHL, J. Einsturzlöcher in silikatischen Gesteinen Venezuelas und Brasiliens. **Z. Geomorphology N. F.** n. 21. v. 4. Berlin. 1977. P. 431-444.

GILLIESON, D. The caves system and karst. In: GILLIESON, D. **Caves: processes, development, management.** Malden: Blackwell Publishers. 1996, p. 1-11.

GUNN, J. Dissolution: silicate rocks. In: GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science.** New York, London: Taylor and Francis Group. 2004. p. 621-622.

HARDT, R. **Formas Cársticas em Arenito**: estudo de caso. Monografia de Especialização. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista. 53p. 2003.

HARDT, R. **Aspectos da morfologia cárstica da Serra do Calcário – Cocalinho – MT**. Dissertação (Mestrado em Organização do Espaço). Rio Claro: Universidade Estadual Paulista. 98p. 2004.

HARDT, R. Da Carstificação em Arenitos. Aproximação com o Suporte de Geotectonologias. Tese (Doutorado em Geografia e Docteur en Géologie). Rio Claro: Universidade Estadual Paulista. Université de Rouen. 2011.

ICEHOWER, J.; DOVE, P. The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions: effects of temperature and ionic strength. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v.64. ânº24. 2000. p.4193-4203.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **As Grutas em Minas Gerais**. 1º ed. Belo Horizonte: Oficinas Gráficas da Estatística. 1939.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Carta Topográfica de Diamantina**. Escala 1:100.000. 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio de Janeiro: Divisão Gráfica/ Departamento de Editoração e Gráfica IBGE. 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Portaria 887 de 15 de junho de 1990**. Brasília. 1990.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. **Plano de Manejo**: Parque Nacional Serra do Cipó e Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira. Brasília: ICMBio. 2009.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO ARTÍSTICO E NACIONAL – IPHAN. **Portaria nº07 de 01 de dezembro de 1988**. Brasília: IPHAN. 1988. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Estação Climática de Diamantina – MG**. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 25/08/2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Disponível: <http://www.inpe.br>

JENNINGS, J. N. **Karst**: an introduction to systematic geomorphology. v.7. The M. I. T. Press: Cambridge. 1971.

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

KARMANN, I.; SANCHEZ, L. E. Distribuição das Rochas Carbonáticas e Províncias Espeleológicas do Brasil. **Espeleotema**. n. 13. 1979. p. 105-168.

KELLER, W. D. **The principles of chemical weathering**. Missouri: Lucas Brothers Publishers. 1968.

KNAUER, L. G. A Geologia da Área do Ribeirão do Inferno, Diamantina, Minas Gerais. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33. **Anais ...** Rio de Janeiro. 1984, p. 1249 – 1261.

KNAUER, L. G. **Evolução geológica do Precambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada**. [Manuscrito]. Dissertação (Mestrado em Geologia). São Paulo: UNICAMP. 1990.

KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa – MG**. São Paulo. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo. 1989. 113p.

KOPPEN, W. **Climatologia**. México. Fundo de Cultura Econômica. 1948.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à Geoquímica**. São Paulo: Polígono. 1972.

KLEIN, C.; HURLBUT JUNIOR, C. S. **Manual of Mineralogy**. New York: John Wiley e Sons. 1999.

LEÃO, M. R.; REZENDE, E. A.; SALGADO, A. A. R.; NALINI JÚNIOR, H. A. Erosão, Denudação e Evolução do Relevo da Média Serra do Espinhaço Meridional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 13. n. 2. 2012. p.113-124.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley and Sons. 1979.

LINO, C. F. **Caverna**: o fascinante Brasil subterrâneo. **Caves**: the fascination of underground Brazil. 2º ed. São Paulo: Gaia. 2009.

LOPES VERGARA, M. L. **Manual de Fotogeologia**. 2ºed. ver. aum. Madrid: J. E. N. Publiciones Cientificas de la Junta de Energia Nuclear. 1978.

MARTINI, J. E. J. Karst in Black Reef Quartzite Near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. **Annals of Geological Survey**. v.13. 1979. p. 115-127.

MARTINI, J. Rate of Quartz Dissolution and Weathering of Quartzite. **The Boletim of the South Africa: Speleological Association**. v. 25. 1984.

MARTINI, J. Dissolutin of Quartz and Silicate Mineral. In: **National Speleologia Society. Speleogenesis** Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/ Alabama: National Speleological Society/ USA. 2000. p. 171-173.

MASSUQUETO, L. L.; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S. Geossítios do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa/PR, Brasil): relevante exemplo de sistema cárstico nos arenitos da Formação Furnas. **Espeleo-Tema**. v. 22. n.1. 2011. Campinas: SBE. 2011. p. 99-110.

MELO, J. W. V.; PEREZ. Solubilidade Mineral. In: MELO V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do solo**. Parte I e II. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2009.p. 158-199.

MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L.; FIGURIM, I.; BAGATIM, H. Q.; GIANNINI, P. C. F. Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/ Brasil e as implicações para a região. **Espeleo-Tema**. v. 22. n. 1. 2011. Campinas: SBE. 2011. p. 81-97.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Instrução Normativa nº 02**, de 20 de Agosto de 2009. Brasília: MMA. 2009. Disponível em: <http://www.cecav.org.br>

MUNSELL COLOR. **Munsell Soil Color Charts**. New Windsor: Washable. 2000.

NOGUEIRA, J. L. Q.; FELINTO, J. I. P. **Mapeamento Geológico do Distrito Diamantífero de Extração**. Diamantina: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Centro de Geologia Eschwege. 1982.

OLIVEIRA, B. S. **A palynological record of late Quaternary vegetation na climatic change in southeastern Brazil**. Dissertação. Ohio: Ohio State University. 1992. 134p.

PALMER, A. N. **Cave Geology**. 2^oed. Kansas: Allen Press. 2009. 454p.

PFLUG, R. **A Geologia da parte Meridional da Serra do Espinhaço e Zonas Adjacentes – MG**. Divisão de Geologia de Minas. Rio de Janeiro: DNPM. 1965.

PILÓ, L. B. **Morfologia Cárstica e Materiais Constituintes: dinâmica e evolução da Depressão Poligonal Macacos – Baú – Carste de Lagoa Santa, MG**. Tese (Doutorado em Geografia). São Paulo: Universidade Estadual de São Paulo. 1998. 283p.

PONTES, H. S.; MELO, M. S. Cavernas da Chaminé, Ponta Grossa, PR, Brasil: potencial espeleológico, recursos hídricos subterrâneos e riscos geoambientais. **Espeleotema**. v. 22. n.11. São Paulo: SBE. 2011. p.111-126.

RENAULT, P. Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénese. **Annales Spéléologie**. n.22, 23. 1968. p. 1- 17.. 209-267 e 259 - 307.

ROBAINA, L. E. S.; BAZZAN, T. Feições Cársticas em Rochas Siliciclásticas no Oeste do Estado do Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 9. n.2. 2008. p.53-64.

RODET, M. J.; RODET, J.; WILLEMS, L.; POUCKET, A.; NASCIMENTO, S. **Geoarqueologia do Parque Estadual do Rio Preto, Minas Gerais, Brasil. Géoarchéologie du Parc Naturel IEF du Rio Preto, Minas Gerais, Brésil**. France: Centre Normand d'Estude du Karst et dès Cavités du Sous-sol. 2009, 59p.

ROMANI, J. R. V.; RODRIGUEZ, M. V. Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution. **Nature Conservation**. n. 63. Corunã. 2005, p. 41-46.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de Cavernas: guia prático**. São Paulo: Redespeleo Brasil. 2005. 92p.

SAADI, A. A Geomorfologia da Serra do Espinhaço de Minas Gerais e de suas margens. **Geonomos**. n. 3, v. 1. 1995. p. 41-63.

SALGADO, A. A. R.; VALADÃO, R. C. Fatores Controladores dos Processos Desnudacionais Geoquímicos no Espinhaço Meridional (Depressão de Gouveia, MG). **Geonomos**. v. 13. n. 1,2. 2005. p. 51-57.

SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, C. A. R.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JÚNIOR, H. A.; CHEREM, L. F. S.; MARENT, B. R.; BRINDUSA, C. B. Estimativa das taxas de erosão das terras altas da alta bacia do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero: implicações para a evolução do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 8. n. 2. 2007, p. 3-10.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*. v. 37. n. 3. 2007. p. 551-564.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5º ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo. 2005. 100p.

SANTOS, E. C. **Levantamento pedológico e perda geoquímica na Bacia do Rio Pardo Pequeno – Espinhaço Meridional – Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) [manuscrito]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2012.

SCHÖLL, W.; FOGAÇA, A. C. C. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. 1. **Anais ...** 1979.

SHELLEY, D. **Manual of Optical Mineralogy**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1975

SILVA, S. M. **Carstificação em Rochas Siliciclásticas: estudo de caso da Serra do Ibitipoca, Minas Gerais**. Dissertação [Mestrado em Geologia]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte. 2004. 157p.

SILVA, M. C. R. **Litofaciologia e Sistemas Depositionais da Formação Sopa-Brumadinho na Campo Diamantífero de Extração, Diamantina – MG**. Dissertação [Mestrado em Geologia]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte. 2010. 227p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA – SBG. Diamantina e a Serra do Espinhaço. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. **Monumentos Geológicos de Minas Gerais**. Placa 01. Diamantina: SBG. 2007.

SOUZA, F. C. R. Caracterização da Morfologia Cárstica Desenvolvida nas Rochas Quartzíticas da Gruta do Salitre, Diamantina (MG). Trabalho de Conclusão de Curso (Geografia). Pirapora: Universidade Estadual de Montes Claros. 2011.

SOUZA, T. A. R. **O Carste em Mármore na Borda Oeste da Serra do Cipó, MG:** investigações acerca da morfodinâmica cárstica. Dissertação [Mestrado em Geografia]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2011. 216p.

STÁVALE, Y. O. **Espacialização do Patrimônio Espeleológico da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço:** geossítios selecionados e sua importância para a geoconservação. Dissertação [Mestrado em Geografia]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte. 2012. 192p.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas Afins.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1998.

SUGUIO, K. **Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais:** (passado + presente = futuro?). São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. 1999. 366p.

SWEETING, M. M. **Karst Landforms.** London: Macmillan, 1972.

SZCZERBAN, E.; URBANI, F. Carsos de Venezuela. Parte 4: Formas carsicas em areniscas precambrianas del território federal Amazonas y estado Bolivar: **Boletín de La Sociedad Venezolana de Espeleologia.** v. 5. 1974. p.27-54.

TEIXEIRA, W.; DUSSIN, I. A.; DUSSIN, T. M.; SALVADOR, E. D.; SIGA JÚNIOR, O.; SATO, K. Interpretação do contexto geotectônico do embasamento na borda leste do Sistema Espinhaço, região de Guanhões e Gouveia – MG, com base numa interpretação do seu conjunto geocronológico U/Pb, Rb/Sr e K/Ar. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Natal. **Anais ...** Natal. SBG, v. 6. 1990, p.2711-2722.

TRAVASSOS, L. E. P.; RODRIGUES, B. D.; MOTTA, A. R. S. (2013). Caverna das Mãos: na example of dark zone rock art in Brazil. **Acta Carsologica**, v. 41, n.2-3, p.304-309, 2012.

UAGODA, R. E. S. **Reconhecimento Geomorfológico de Relevo Cárstico em Rochas Quartzíticas:** Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santana, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Dissertação (Mestrado em Geografia). Rio de Janeiro: UFRJ/IGEO/PPGG. 2006.

UAGODA, R.; COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S. Morfologia de Depressões Fechadas em Domínio Cárstico-Quartzítico na Bacia do Ribeirão Santana/MG: datações absolutas iniciais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 10. n.2. 2009. p. 91-98.

UAGODA, R.; AVELAR, A.; COELHO NETTO, A. L. Karstic morphology control in non-carbonate rocks: Santana Basin, middle Paraíba do Sul river valley, Brazil. **Zeitschrift für Geomorphologie**. v. 55. n.1. 2011. p.1-13.

UHLEIN, A. **Transição Craton – Faixa Dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais**: aspectos estratigráficos e estruturais. [manuscrito]. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 1991, 295p.

URBANI, F. Uma revision preliminar sobre El desarrollo de cavidades y otras formas relacionadas em las rocas cuarcíferas del Grupo Roraima, Guayana Venezolana. **Boletín de Geociencias**. n. 7. Caracas: Universidad Central de Venezuela. 1986a. p.10-15.

URBANI, F. Notas sobre el origen de las cavidades em rocas cuarcíferas precambrianas del Grupo Roraima, Venezuela. **Interciencia**. v. 11, n. 6. Caracas. 1986b. p. 298-300.

VIEGAS, R. F. **Mapeamento Geológico em Escala 1:10.000 do Distrito de Extração, Região SE de Diamantina, Minas Gerais**. TCC de Geologia [Manuscrita]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2010.

VIERS, J.; DUPRÉ, B.; POLVÉ, M.; SCHOTT, J.; DANDURAND, J.; BRAUN, J. Chemical weathering in the basin of the tropical watershed (Nsimi-Zoetele site, Cameroon): comparison between organic-poor and organic rich waters. **Chemical Geology**. v.140.1997. p. 181-206.

VILES, H.; PENTECOST, A. Problems in assessing the weathering action of lichens with an example of epiliths on sandstone. In: ROBINSON, D. A.; WILLIAMS, R. B. S. **Rock Weathering and Landform Evolution**. John Wiley & Sons Ltd. 1994. p. 99-116.

WHITE, W. B.; JEFFERSON, G. L.; HAMAN, J. F. Quartzite Karst in Southeastern Venezuela. **International Journal of Speleology**. v. 2. 1966. p.309-314.

WHITE, W. B. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. Oxford University Press. 1988. 464p.

WIEGAND, J.; FEY, M.; HAUS, N.; KARMANN, I. Investigações Geoquímicas e hidroquímicas da gênese de carste em arenitos e quartzitos da Chapada Diamantina e Quadrilátero Ferrífero (Brasil). v.155. 2004. p.61-90.

WILLEMS, L.; COMPERE, L.; SPONHOLZ, B. Study os siliceous karst genesis in eastern Niger: microscopy and X-ray microanalysis of speleothems. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v.42. 1998. p.129-142.

WILLEMS, L.; COMPERE, P.; HATERT, F.; POUCLLET, A.; VICAT, J. P. C.; BOULVIAN, F. Karst in granitic rocks, South Cameroon: cave genesis and silica and taranakite speleothems. **Terra Nova**, v.14. n.5. 2002. p.355-362.

WILLEMS, L. **Phénomènes karstiques em roches silicates non carbonates: cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale**. Tese (Doutorado em Ciências). Faculté des Sciences, Universite de Liege. Liege (França). Defesa 2000. Volume 2006.

WILLEMS, L.; RODET, J.; POUCLLET, A.; MELO, S.; RODET, M. J.; COMPÉRE, P.H.; HATERT, F.; AULER, A. A. Karst in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**. Belgium: Corunã. 33. 2008, p.127-138.

WRAY, R. A. L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth-Science Reviews**. v. 42. 1997a. p.137-160.

WRAY, R. A. L. The formation and significance of coralline silica speleothems in the Sidney Basin, southeastern Australia. **Physical Geography**, v.18. 1997b. p. 01-17.

WRAY, R. A. L. Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstone in the Sidney region, southeastern Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 46, p. 623-632, 1999.

WRAY, R. A. L. Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? **Virtual Scientific Journal Speleogenesis and evolution of karst Aquifers**, 2. p.1-9, Apr./ 2003.

YARIV, S.; CROSS, H. **Geochemistry of Colloid Systems for Earth Scientists**. Berlin: Springer-Verlag. 1979. 450p.

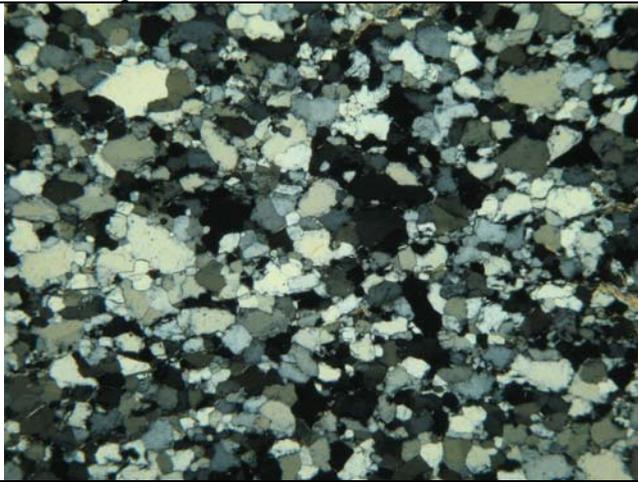
YOUNG, R. W.; YOUNG, A. R. M. **Sandstone Landforms**. Berlin: Springer Verlag. 1992. 163p.

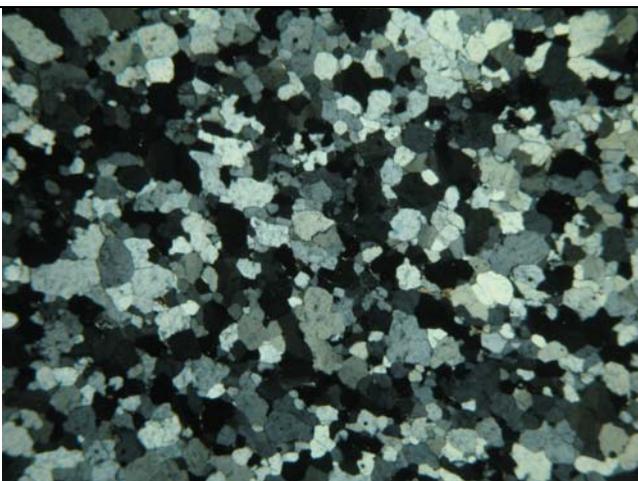
YOUNGER, R. W. Quartz etching and sandstone karst: example from the East Kimberleys, Northwestern Australia. **Zeitschrift fur Geomorphologie**. v.32. 1988. p.409-423.

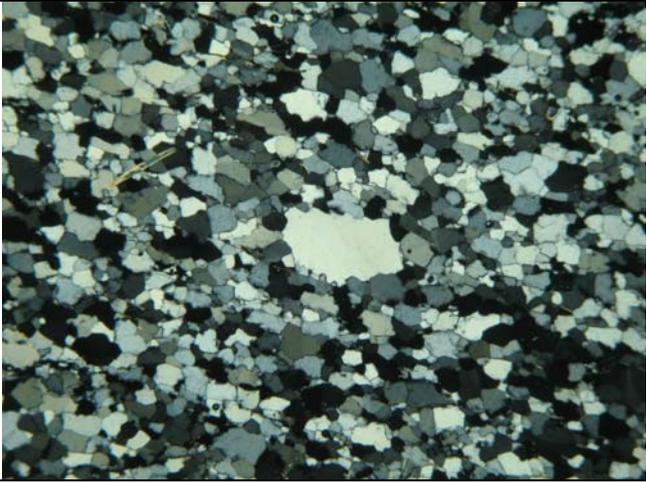
YOUNGER, P. L.; STUNELL, J. M. Karst and Pseudokarst: an artificial distinction? In: WILLEY, J; SONS. **Geomorphology and Groundwater**. Bown A. G. ed. 1995. p. 121-142

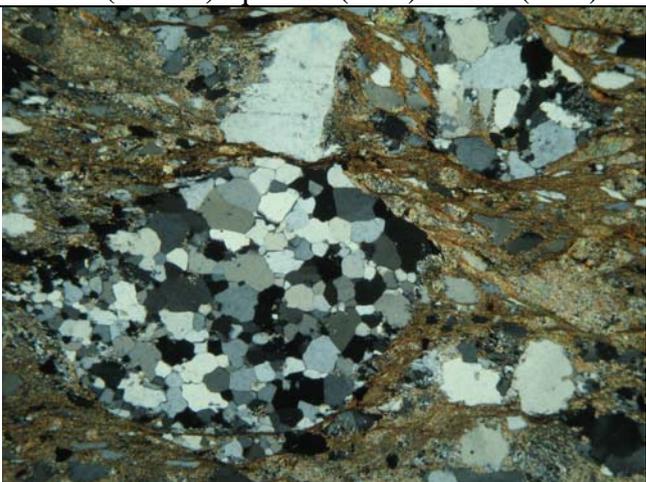
ANEXOS

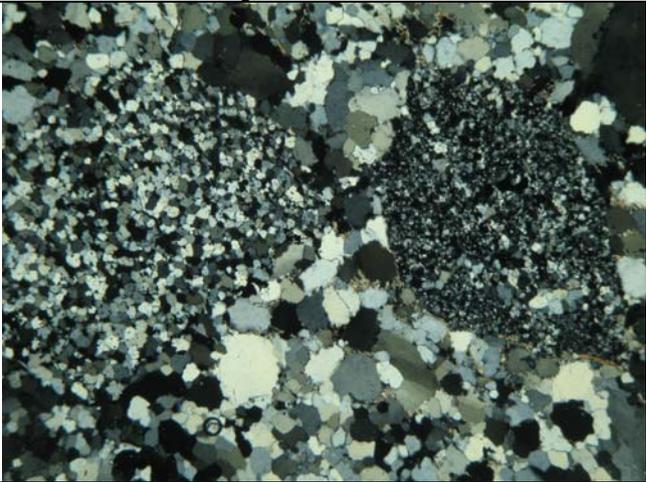
DESCRIBÇÃO PETROGRÁFICA

Nº da lâmina: B06		Data de coleta: 26/11/2012	
Coordenadas UTM: N: 7980400		E: 654783	
Datum SAD 69		Zona 23K	
Cavidade associada: Gruta do Salitre e Gruta Monte Cristo			
Descrição microscópica			
Minerais componentes em ordem de abundância: quartzo (98%) e mica (1%)			
<p><u>Quartzito micáceo</u> A rocha é bem selecionada e com alta maturidade textural. Possui grãos arredondados com tamanhos que variam de 0,4 a 0,1mm. Apresenta granulometria_____.</p> <p>A rocha apresenta textura granoblástica e foliação.</p>			

Nº da lâmina: B09		Data de coleta: 27/11/2012	
Coordenadas UTM: N: 7979261		E: 653883	
Datum SAD 69		Zona 23K	
Feição cárstica associada: kamenitzas e karrens			
Descrição microscópica			
Minerais componentes em ordem de abundância: quartzo (95%), mica (2%) , óxidos e hidróxidos de ferro (3%)			
<p><u>Quartzito</u> Rocha constituída essencialmente por quartzo, mica e hidróxido de ferro. Apresenta textura granoblástica, com contato reto entre os grãos. Os grãos são esféricos a arredondados, com tamanhos que variam de 0,4 a 0,2mm.</p>			

Nº da lâmina: B39		Data de coleta: 29/11/2012	
Coordenadas UTM: N: 7978253		E: 656630	
Datum SAD 69		Zona 23K	
Cavidade associada: Gruta das Falhas (maciço)			
Descrição microscópica			
Minerais componentes em ordem de abundância (matriz): quartzo (90%), feldspato (8%) e mica (2%)			
<p><u>Paraconglomerado</u></p> <p>Arcabouço: é constituído por grânulos e seixos angulosos a arredondados, composto por quartzo e quartzito laminado.</p> <p>Matriz: é constituída por quartzo, feldspato e mica; apresenta baixa maturidade mineralógica e textural. Possui granulometria areia média a grossa. A rocha possui foliação incipiente.</p>			

Nº da lâmina: B42B		Data de coleta: 30/11/2012	
Coordenadas UTM: N: 7976513		E: 656351	
Datum SAD 69		Zona 23K	
Cavidade associada: Furna Mulatinho (ressalta-se que a coleta foi realizada na Mina Serrinha por considerá-la representativa para o meio superficial e subterrâneo)			
Descrição microscópica			
Minerais componentes em ordem de abundância (matriz): quartzo (64%) e mica (36%)			
<p><u>Ortoconglomerado</u></p> <p>Arcabouço: é constituído por grânulos e seixos subarredondados a arredondados, composto por quartzo, quartzito e metapelitos.</p> <p>Matriz: é constituída por quartzo e mica; apresenta baixa maturidade. Possui granulometria areia fina à média. A rocha possui foliação.</p>			

Nº da lâmina: B46A		Data de coleta: 30/11/2012	
Coordenadas UTM: N: E:		Altitude:	
Datum SAD 69 Zona 23K			
Cavidade associada: Gruta Extração (maciço e interior da cavidade)			
Descrição microscópica			
Minerais componentes em ordem de abundância (matriz): quartzo (95%) e mica (5%)			
<u>Ortoconglomerado</u> Arcabouço: é constituído por grânulos e seixos angulosos a arredondados, composto por quartzo, quartzito, quartzito micáceo e quartzo fumê. Matriz: é constituída por quartzo e mica; apresenta baixa maturidade. Possui granulometria areia fina à média. A rocha possui foliação.			
		Legenda Nº da foto: IMC_0090 Aumento: 2,5x	

Caracterização morfológica das kamenitzas na região sudeste de Diamantina/MG

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UTM_N	7978241	7978540	7976105	7978965	7979258	7977105	7978925	7977506	7978301	7978659	7976288	7976414
UTM_E	655819	655630	652414	653254	653876	653012	654264	655839	654611	654321	654109	655265
Elevação	1100	1141	937	1082	1121	1111	1164	1172	1131	1144	941	997
Profundidade Central (cm)	11	3	25	22	10	20	21	22	17	18	19	42
	12	6	8	18	18	18	18	12	32	30	7	18
	13	3	19	22	15	7	12	21	17	22	17	6
	15	20	28	18	15	8	15	18	25	10	29	10
	12	2	22	12	5	17	10	20	35	8	22	19
	3	3	21	16	3	38	15	21	12	28	21	32
	10	4	39	10	28	21	12	11	18	38	37	19
	11	12	31	8	16	19	19	15	28	23	12	18
	9	4	28	15	30	19	18	16	31	15	26	15
	9	18	20	8	10	8	15	11	24	42	21	6
Eixo maior (cm)	132	72	150	56	52	40	42	100	110	82	126	60
	168	137	53	78	102	30	293	161	165	82	76	30
	90	99	92	126	121	40	80	61	234	120	98	40
	59	168	108	120	74	39	115	164	184	40	102	38
	75	114	60	68	105	57	106	159	169	110	83	57
	195	140	79	77	125	115	240	161	120	120	79	108
	75	116	108	54	105	104	97	114	132	120	109	92
	58	169	72	106	86	46	70	30	278	60	72	45
	109	115	71	118	122	45	95	49	285	54	56	38
	125	128	68	64	49	56	72	114	108	172	70	54
Eixo menor (cm)	72	70	80	31	49	29	29	62	70	60	102	29
	74	74	48	39	52	15	62	66	156	55	48	18
	33	63	70	47	87	30	35	26	120	98	71	29
	29	95	53	80	69	22	80	64	73	30	55	22
	47	60	55	49	44	23	49	138	129	40	52	23
	100	118	49	56	102	65	129	30	65	108	48	68
	40	71	80	36	74	56	69	30	90	64	76	57
	54	99	53	60	60	27	52	20	140	29	53	26
	69	66	28	42	100	21	40	39	118	27	28	23
	66	80	52	26	32	25	49	49	72	64	55	28

