

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geografia

Amanda Garcia Amaral Silva

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DE CAVIDADES NATURAIS
SUBTERRÂNEAS: PERSPECTIVAS PARA UMA CLASSIFICAÇÃO
MORFOLÓGICA E PLANIMÉTRICA DAS CAVERNAS FERRÍFERAS NO BRASIL**

Belo Horizonte

2021

Amanda Garcia Amaral Silva

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DE CAVIDADES NATURAIS
SUBTERRÂNEAS: PERSPECTIVAS PARA UMA CLASSIFICAÇÃO
MORFOLÓGICA E PLANIMÉTRICA DAS CAVERNAS FERRÍFERAS NO BRASIL**

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

Área de concentração: Geografia Física

Orientador: André Augusto Rodrigues Salgado

Coorientador: Allan Silas Calux

Belo Horizonte

2021

S586c
2021

Silva, Amanda Garcia Amaral.

Caracterização morfométrica de cavidades naturais subterrâneas [manuscrito] : perspectivas para uma classificação morfológica e planimétrica das cavernas ferríferas no Brasil. / Amanda Garcia Amaral Silva. – 2021.

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

Orientador: André Augusto Rodrigues Salgado.

Coorientador: Allan Silas Calux.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2021.

Área de concentração: Geografia Física.

Bibliografia: f. 99-103.

1. Espeleologia – Teses. 2. Grutas – Brasil – Teses. 3. Ferro – Teses. I. Salgado, André Augusto Rodrigues. II. Calux, Allan Silas. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. IV. Título.

CDU: 551.44(81)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Caracterização Morfométrica de Cavidades Naturais Subterrâneas: Perspectivas para uma Classificação Morfológica e Planimétrica das Cavernas Ferríferas no Brasil"

AMANDA GARCIA AMARAL SILVA

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

Aprovada em 02 de setembro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. André Augusto Rodrigues Salgado - Orientador

UFMG

Prof. Luiz Eduardo Panisset Travassos

UFMG

Prof. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

UNB

Belo Horizonte, 2 de setembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, Usuário Externo**, em 16/11/2021, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Panisset Travassos, Usuário Externo**, em



18/11/2021, às 07:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Augusto Rodrigues Salgado, Professor do Magistério Superior**, em 18/11/2021, às 14:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1082211** e o código CRC **D3731AF5**.

Aos “vazios” que na beleza da escuridão,
trouxeram muita luz à minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador André Salgado, agradeço por me acompanhar desde os primeiros passos na iniciação científica e no trabalho de conclusão de curso, além de ser o primeiro a me incentivar no nascer de um sonho que foi participar do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFMG. Agradeço a paciência e determinação em acreditar e me ajudar a crescer academicamente ao longo destes seis anos de parceria e aprendizado. Apostar em mim certamente foi o gatilho de tantas oportunidades e realizações que me foram concedidas!

Ao meu coorientador Allan Calux agradeço imensamente por aceitar o convite de me guiar nestes turbulentos dois anos e meio. Por doar seu tempo a se dedicar ao meu aprendizado com tanta empatia e presença, saber elogiar e criticar sem nunca me deixar desistir com seus “meigos” sermões. Além de me conceder o privilégio de ter um excelente mentor acadêmico e profissional, te agradeço pela grande amizade construída. Te admiro muito e você sabe disso!

Aos meus queridos amigos e exemplares geólogos Gabriel Galdino e Tomás Corrêa agradeço por serem tão solícitos a me ajudarem em vários momentos nas discussões de conteúdo, obtenção de bibliografias, sugestões de ferramentas e respectivas aplicações. Obrigada por estarem sempre por perto participando desta e de outras etapas importantes da minha vida.

Aos meus companheiros do programa de pós-graduação Wesley Rodrigues e Jorge Rosário agradeço por compartilharem vivências e conhecimento, além de todas as vezes que estiveram de prontidão para contribuir com materiais e técnicas que foram de grande importância para o desenvolvimento do presente trabalho. Ao Johann Waterkemper agradeço a disposição em me auxiliar na elaboração do fluxo de trabalho no *Orange* com tamanha consideração.

Aos meus pais sou grata por batalharem pelas inúmeras oportunidades que me trouxeram até aqui. Obrigada por nunca terem deixado de acreditar e confiar nos planos e sonhos que eu escolhi, por serem a base para que eu possa me reerguer de qualquer tropeço e por tentarem compreender a minha ausência mesmo quando a saudade aperta.

Aos meus amigos próximos que estiveram comigo ao longo do mestrado demonstrando apoio, compreensão e carinho nos momentos que mais precisei, agradeço por serem tão especiais na minha trajetória e me acolherem com tanto amor.

Por fim, agradeço a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado que me possibilitou a dedicação exclusiva a esta pesquisa durante quase todo seu desenvolvimento.

RESUMO

Os processos espeleogenéticos e condicionantes ambientais que atuam nos ambientes ferruginosos muito se diferem dos clássicos mecanismos geoquímicos que propiciam a morfogênese das cavernas carbonáticas. Nesta perspectiva, a realização da presente pesquisa propôs investigar a possível correlação entre determinadas variáveis ambientais com similaridades morfológicas em planta e atributos morfométricos de uma amostra aleatória de 227 cavidades ferríferas distribuídas nas Províncias Espeleológicas da Serra dos Carajás (PA) e do Quadrilátero Ferrífero (MG). Para tanto foram selecionados oito parâmetros morfométricos anteriormente elaborados e aplicados na análise de cavidades em outras litologias, além de um índice supostamente inédito. Os parâmetros foram individualmente explorados e posteriormente correlacionados através de ferramentas disponíveis no *software Orange Datamine* com a finalidade de se obter agrupamentos de feições semelhantes. Foram identificados sete grupos morfológicos preliminares nos quais todos contemplam cavidades provenientes das duas províncias espeleológicas, o que leva a crer que os processos envolvidos na gênese das feições destas duas áreas são similares. Além disso, concluiu-se que para o sucesso finalmente concreto destes estudos, parâmetros específicos, preferencialmente em 3D, devem ser desenvolvidos de forma a contemplar a especificidade dos ambientes ferríferos.

Palavras-chave: Morfometria, espeleogênese, cavidades ferríferas.

ABSTRACT

The speleogenetic processes and environmental conditions that act in ferruginous environments are very different from the classic geochemical mechanisms that favor the morphogenesis of carbonate caves. Under this perspective, the present research proposed to investigate the possible correlation between certain environmental variables with morphological similarities and morphometric attributes of a random sample of 227 iron caves distributed in the Speleological Provinces of Serra dos Carajás (PA) and Quadrilátero Ferrífero (MG). For this purpose, seven morphometric parameters previously elaborated and applied in the analysis of caves in other lithologies were selected, in addition to a supposedly unprecedented index. The parameters were individually explored and later correlated using tools available in the Orange Datamine software to obtain clusters of similar features. Seven preliminary morphological groups were identified, all of which include caves from the two speleological provinces, which suggests that the processes involved in the genesis of the caves in these two areas are similar. Furthermore, it was concluded that for the final concrete success of these studies, specific parameters, preferably in 3D, must be developed to contemplate the specificity of the iron environments.

Keywords: Morphometry, speleogenesis, iron caves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização das cavidades nas áreas de estudo: Serra dos Carajás - PA (1) e Quadrilátero Ferrífero – MG (2).	17
Figura 2.1 - Quadro espeleogenético esquemático para as cavernas da Serra dos Carajás (PA): Estágio 1 – Processo inicial de dissolução da rocha, preferencialmente nos planos de falhas e/ou fraturas e nos locais de marcantes contrastes lito-faciológico e texturais; Estágio 2 – Variações do nível hidrostático. Formação de pequenas cavidades de dissolução, isoladas, no topo da zona freática. Pequenas cavidades em zona vadosa; Estágio 3 – Formação de proto-cavernas na zona vadosa, resultantes da interação do fluxo d'água subterrâneo, intemperismo químico e erosão fluvial nas encostas, sobre a zona previamente preparada pela dissolução inicial; Estágio 4 – Formação de cavernas, a partir de processos de incisão das proto-cavernas com ação contínua do fluxo subterrâneo em direção às encostas e ao nível hidrostático. Modificado de Pinheiro et al. (1985).	22
Figura 2.2 - Esquema evolutivo para as cavernas em rochas ferríferas da Serra dos Carajás. 1) Formação da crosta ferruginosa e diferenciação da canga a partir de processos intempéricos sobre rochas variadas. 2) Dissecção do relevo e oscilações do nível freático. Implantação de cavidades subterrâneas em zonas de concentrações de compostos instáveis resultantes dos processos de formação da canga. 3) em regime vadoso, atuação de agentes hidráulicos. Fase de erosão física e desmoronamento de blocos. Modificado de Pinheiro e Mautrity (1988).	23
Figura 2.3 - Evolução da zona de baixa densidade na interface crosta- saprólito e formação de cavernas: Estágio 1 – Percolação de soluções aquosas ao longo de fissuras e fraturas, e desenvolvimento de um sistema reticulado de vazios. Mobilização de ferro e alumínio; Estágio 2 – Preenchimento de fissuras e fraturas na interface crosta-saprolito por óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, gerando estruturas do tipo boxwork; Estágio 3 – Desenvolvimento da zona de baixa densidade através da dissolução e da eluviação lateral da matriz argilosa. Colapso parcial desta zona e formação de cavidades. Modificado de Maurity e Kotschoubey (1995).	24
Figura 2.4 – Paleotoca localizada na província espeleológica do Quadrilátero Ferrífero. (A) Marcas das ranhuras de escavações; (B) conduto da cavidade. Fotos: Vitor Moura e Luciana Alt.	27
Figura 2.5 - Exemplo de cavidade originada por erosão em margem de drenagem. Fonte: Dutra (2015).	28
Figura 2.6 - Exemplo de cavidade possivelmente originada a partir de erosão por cachoeira. Modificado de Dutra (2015).	29
Figura 2.7 – Exemplo de cavidade de tálus na Serra da Piedade, município de Caeté - MG. (A) Entrada da cavidade formada por sobreposição de matacões de itabirito; (B) Teto da caverna. Modificado de Pereira (2012).	30
Figura 3.1 - Mapa geológico do domínio Carajás e áreas adjacentes. Fonte: Monteiro et al. (2014), modificado de Vasquez et al. (2008).	32
Figura 3.2 - Superfície de aplainamento, em último plano, observada na região da Serra do Sereno, Serra dos Carajás. Foto: Allan Calux.	34
Figura 3.3 - Floresta (esquerda) e savana metalófila (direita), coberturas vegetais típicas da Serra dos Carajás. Fotos: Allan Calux.	35

Figura 3.4 – Relação de limites entre o cráton do São Francisco e os limites do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkimim e Marshak (1998).	36
Figura 3.5 – Mapa litológico simplificado (modificado de Dorr, 1969) e modelo digital de elevação do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Heilbron et al. (2017).	37
Figura 3.6 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. A esquerda da coluna corresponde à porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, enquanto a direita representa a porção oriental. Fonte: Alkmim e Marshak, (1998).	38
Figura 3.7 – Contraste da configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero. Foto: André Salgado.	40
Figura 3.8 - Vegetações típicas do Quadrilátero Ferrífero. (A) Campo rupestre; (B) cerrado e (C) floresta semidecidual. Fotos: André Salgado.	41
Figura 4.1 – (A) t-SNE em perplexidade baixa; (B) t-SNE com estrutura global preservada.	50
Figura 5.1 – Distribuição por litologias da amostra.	55
Figura 5.2 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa EW/IW.	59
Figura 5.3 – Scatter plot de correlação entre o índice de complexidade horizontal e a taxa EW/IW.	60
Figura 5.4 – AP_0009, cavidade com baixa taxa EW/IW e alto índice de complexidade horizontal. CX_0007, cavidade com alta taxa EW/IW e baixo índice de complexidade horizontal.	61
Figura 5.5 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa S/L.	62
Figura 5.6 – Scatter plot de correlação entre índice de redondeza e taxa S/L.	63
Figura 5.7 – SL_0123, cavidade com baixa taxa S/L e alto índice de redondeza. SPA_0021, cavidade com alta taxa S/L e baixo índice de redondeza.	63
Figura 5.8 – Histograma de distribuição dos resultados do volume específico.	65
Figura 5.9 – scatter plot de correlação entre projeção horizontal e volume específico.	66
Figura 5.10 – N3_0023, caverna com baixo volume específico e alta projeção horizontal. PESL, abrigo com alto volume específico e baixa projeção horizontal. ...	66
Figura 5.11 - Histograma de distribuição dos resultados da cobertura areal.	68
Figura 5.12 – Scatter plot de correlação entre cobertura areal e projeção horizontal.	69
Figura 5.13 – AP_0038, caverna com baixa cobertura areal e alta projeção horizontal. GOGO_0007, abrigo com alta cobertura areal e baixa projeção horizontal.	69
Figura 5.14 – Histograma de distribuição dos resultados da densidade de passagens.	71
Figura 5.15 – Scatter plot de correlação entre densidade de passagens e projeção horizontal.	72
Figura 5.16 – Serp_0147, maior cociente de densidade de passagens da amostra. MS_0021_0022, apesar de ser uma das maiores cavidades, apresentou densidade de passagens relativamente média.	72
Figura 5.17 – Histograma de distribuição dos resultados do índice de complexidade horizontal.	73
Figura 5.18 – Scatter plot de correlação entre índice de complexidade horizontal e projeção horizontal.	74

Figura 5.19 – M_0021_0022, caverna com alto índice de complexidade horizontal e alta projeção horizontal. N3_0077, abrigo com baixo índice de complexidade horizontal e baixa projeção horizontal.	74
Figura 5.20 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa A/P.	75
Figura 5.21 – Scatter plot da correlação entre taxa A/P e projeção horizontal.	76
Figura 5.22 – MS_0021_0022, passagens estreitas mais relevantes que salões resultou em baixa taxa A/P. N3_0023, Salões amplos e condutos pouco expressivos levaram a uma alta taxa A/P.	76
Figura 5.23 – Histograma de distribuição dos resultados do índice de redondeza...77	77
Figura 5.24 – Scatter plot de correlação entre o índice de redondeza e a taxa S/L. 78	78
Figura 5.25 – BR_0064, cavidade com alto índice de redondeza e baixa taxa S/L. S11C_0013, caverna com baixo índice de redondeza e alta taxa S/L.	79
Figura 5.26 – Ordenação dos parâmetros por score.	80
Figura 5.27 – Dendograma resultante do agrupamento hierárquico realizado.	81
Figura 5.28 – (A) Simulação no silhouette plot da utilização de quatro clusters resulta na configuração do cluster C4 sem confiabilidade. (B) O teste realizado com dois clusters, apesar de não demonstrar alteração significativa em C1, apresenta um relevante aperfeiçoamento no grupo C2.	81
Figura 5.29 - Resultado da matriz de confusão.	82
Figura 5.30 - Tabela de referente às classificações incorretas do modelo.	82
Figura 5.31 – Exemplos de abrigos considerados como semielípticos da amostra..84	84
Figura 5.32 – Exemplo de cavidades reticuladas com possibilidade de gênese mista. A primeira pelas entradas diminutas em relação à maior largura e a segunda por aparente interceptação de câmara oclusa.	85
Figura 5.33 – A primeira cavidade representa a coalescência de duas feições retilíneas na entrada e a segunda ilustra uma aparente interceptação erosiva da feição nas duas extremidades do maciço.	86
Figura 5.34 – Cavidades irregulares oclusas semelhantes às cavernas espongiiformes hipogênicas descritas por Palmer (1991).	88
Figura 5.35 – Cavidades irregulares oclusas com salão principal associado a pequenos condutos.	88
Figura 5.36 – Exemplo de cavidades oclusas no formato chamber.	89
Figura 5.37 – Exemplo de cavidades triangulares, sendo as duas superiores cavernas e as duas inferiores abrigos.	90
Figura 5.38 – Exemplos de abrigos identificados como retangulares.....	92
Figura 5.39 – Paleotocas constatadas na amostra.....	93
Figura 5.40 - Feições resultantes de possível coalescência de cavidades de mesma gênese. A primeira referente à união de duas cavidades oclusa e a segunda a junção por canalículos de dois abrigos possivelmente gerados por erosão.	94
Figura 5.41 - Exemplo de cavidades de gênese mista. Interceptação de abrigo com cavidades inicialmente oclusas através de canalículo ou conduto.....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Descrição dos parâmetros morfométricos designados.....	43
Quadro 4.2 - Imagens ALOS PALSAR utilizadas.	47
Quadro 4.3 - Descrição dos dados categóricos utilizados.....	51
Quadro 5.1 - Distribuição das cavidades da amostra por projeção horizontal.....	52
Quadro 5.2 – Características gerais relacionadas à projeção horizontal.....	52
Quadro 5.3 – Distribuição das cavidades quanto à inserção no relevo.	53
Quadro 5.4 – Relação entre posição na vertente (média e alta) e principais litologias na Serra dos Carajás.	54
Quadro 5.5 – Relação entre posição na vertente (média e alta) e principais litologias na Serra dos Carajás.	55
Quadro 5.6 – Relação entre litologia e projeção horizontal.	55
Quadro 5.7 – Características das cavidades maiores que 100 metros da amostra..	57
Quadro 5.8 – Medidas de tendência central e variabilidade referentes aos parâmetros considerados.	58

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1.1 HIPÓTESES.....	16
1.2 OBJETIVOS	16
2 ESPELEOGÊNESE DAS CAVIDADES FERRÍFERAS	18
3 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	31
3.1 PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DA SERRA DOS CARAJÁS.....	31
3.2 PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 PROJEÇÃO HORIZONTAL, POSIÇÃO NA VERTENTE E LITOLOGIA	52
5.2 INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS.....	57
5.3 MORFOLOGIAS IDENTIFICADAS	83
5.4 DISCUSSÕES COMPLEMENTARES.....	95
6 CONCLUSÕES	97
7 REFERÊNCIAS.....	99

INTRODUÇÃO

A ocorrência de cavidades naturais subterrâneas hospedadas em rochas ferríferas é reportada na literatura internacional desde o século XIX (Auler *et al.*, 2014). No Brasil, o primeiro registro foi feito por Saint Hilaire em 1818, quando o naturalista descreveu a Caverna Eremita, localizada na Serra da Piedade, região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Sainte-Hilaire, 1974). Após a realização de alguns estudos pioneiros isolados, pesquisas sistemáticas mais detalhadas foram feitas pelos geólogos do United States Geological Survey (USGS). Merece destaque os trabalhos realizados por George Simmons (1963, 1964) nos quais o pesquisador americano propôs o primeiro modelo espeleogenético de cavidades em formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero (MG). No entanto, foi apenas após a expansão da demanda por minério de ferro pelo mercado externo, bem como por consequência do aumento no rigor da legislação ambiental brasileira, que já no início do século XXI houve um incremento dos cadastros e estudos referentes às cavernas em rochas ferríferas, além do reconhecimento do valor desta litologia para o patrimônio espeleológico brasileiro (Auler e Piló, 2005).

Segundo Calux e Cassimiro (2015) os estudos voltados ao licenciamento ambiental contribuíram significativamente com a geração de dados quantitativos e qualitativos a respeito da morfologia das cavidades ferríferas. Isto permitiu apontar que no Brasil, onde se encontram os maiores depósitos de minério de ferro do mundo, a ocorrência destas geoformas é recorrente. Tal fato comprova-se pelo progressivo cadastro em bases de dados públicas e privadas que, atualmente, ultrapassa as quatro mil cavidades (CANIE, 2020), concentradas principalmente nas províncias espeleológicas da Serra dos Carajás (PA) e do Quadrilátero Ferrífero (MG).

Por se tratar de uma temática recente, os aspectos relacionados aos mecanismos envolvidos na gênese das cavidades ferríferas ainda não foram completamente esclarecidos e, aparentemente, muito se diferem dos clássicos padrões geoquímicos que atuam na morfogênese das cavernas carbonáticas. Tal fato é evidenciado pelas particularidades morfológicas encontradas em cavidades ferríferas quando comparadas aos padrões observados em outras litologias tais como calcário e arenito. Por outro lado, a tentativa de se compreender esse fenômeno têm possibilitado a geração de novos dados, hipóteses e significativas descobertas (Auler

e Piló, 2005). Neste contexto, diferentes modelos espeleogenéticos foram desenvolvidos nos últimos anos a fim de se investigar os principais mecanismos responsáveis pela morfogênese das cavidades ferríferas. Desta forma, acredita-se que assim como nas demais litologias, a variabilidade morfológica na qual estas cavernas se exibem decorre das relações estabelecidas entre uma diversidade de elementos relacionados às condições geográficas, geológicas e biológicas específicas dos ambientes ferríferos.

Em 1991, o pesquisador Arthur Palmer categorizou os principais padrões planimétricos observados em cavidades carbonáticas, correlacionando a morfologia dos condutos com os condicionantes genéticos estabelecidos em seu contexto evolutivo. No entanto, parcialmente em decorrência do avançado estágio evolutivo no qual as cavidades ferríferas se encontram, a maioria já considerada como fóssil (Calux e Cassimiro, 2015), a categorização de Palmer (1991) não se aplica, pois as feições que tipificam a gênese destas feições, muitas vezes se encontram “mascaradas” pelos processos erosivos estabelecidos ao longo do tempo. Além disso, a dissolução dos minerais nas formações ferríferas possui características próprias que diferem daquelas que comandam as hospedadas nos carbonatos ou nas rochas siliciclásticas.

A presente pesquisa pretende ser um primeiro passo para que a relação traçada por Palmer (1991) para as cavidades carbonáticas também possa ser estabelecida para as cavidades naturais hospedadas em formações ferríferas. Para tanto, procura estabelecer relações entre as variáveis ambientais como posição na vertente e litologia com a morfometria de centenas de cavernas ferríferas no Brasil. Vale ressaltar que a geomorfometria consiste na aplicação de descritores quantitativos das características de geoformas, na qual uma de suas funcionalidades compreende o desenvolvimento de métodos de classificação objetivos para as formas de relevo. Portanto, a geomorfometria pode fornecer indicadores referentes aos processos geomorfológicos atuantes, assim como índices que permitem diferenciar e comparar as formas de relevo em estudos relacionados à geomorfologia (Bettú e Soares, 2013). Quando aplicadas às cavidades, as análises de parâmetros morfométricos procuram estabelecer uma conexão entre estrutura, litologia, geomorfologia e fatores hidrológicos, fornecendo subsídio para a compreensão dos atributos que regem a morfogênese de cavidades naturais (Pardo-Iguzquiza *et al.*, 2011).

1.1 HIPÓTESES

A principal hipótese do trabalho é de que a variabilidade morfológica constatada nas cavidades ferríferas é reflexo das condições ambientais e processos espeleogenético estabelecidos no tempo e no espaço. Desta forma, mesmo considerando o estágio evolutivo das feições como predominantemente fósseis, espera-se que a análise estatística dos parâmetros morfométricos permita o agrupamento de cavidades que apresentem características similares.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa consiste em investigar a potencial correlação entre variáveis ambientais com similaridades morfológicas e os atributos morfométricos de um conjunto de cavidades hospedadas em formações ferríferas das Províncias Espeleológicas da Serra dos Carajás (PA) e do Quadrilátero Ferrífero (MG) (Figura 1.1). Os objetivos específicos são:

- Investigar os principais processos morfogenéticos de cavidades ferríferas já propostos para as duas províncias espeleológicas;
- Realizar o cálculo de 8 parâmetros morfométricos de uma amostra aleatória de 227 cavidades, sendo 123 localizadas na região da Serra dos Carajás e 104 no Quadrilátero Ferrífero;
- Identificar grupos de cavernas por meio de análise de similaridade dos atributos morfométricos;
- Relacionar os resultados obtidos (agrupamentos) a possíveis processos espeleogenéticos.

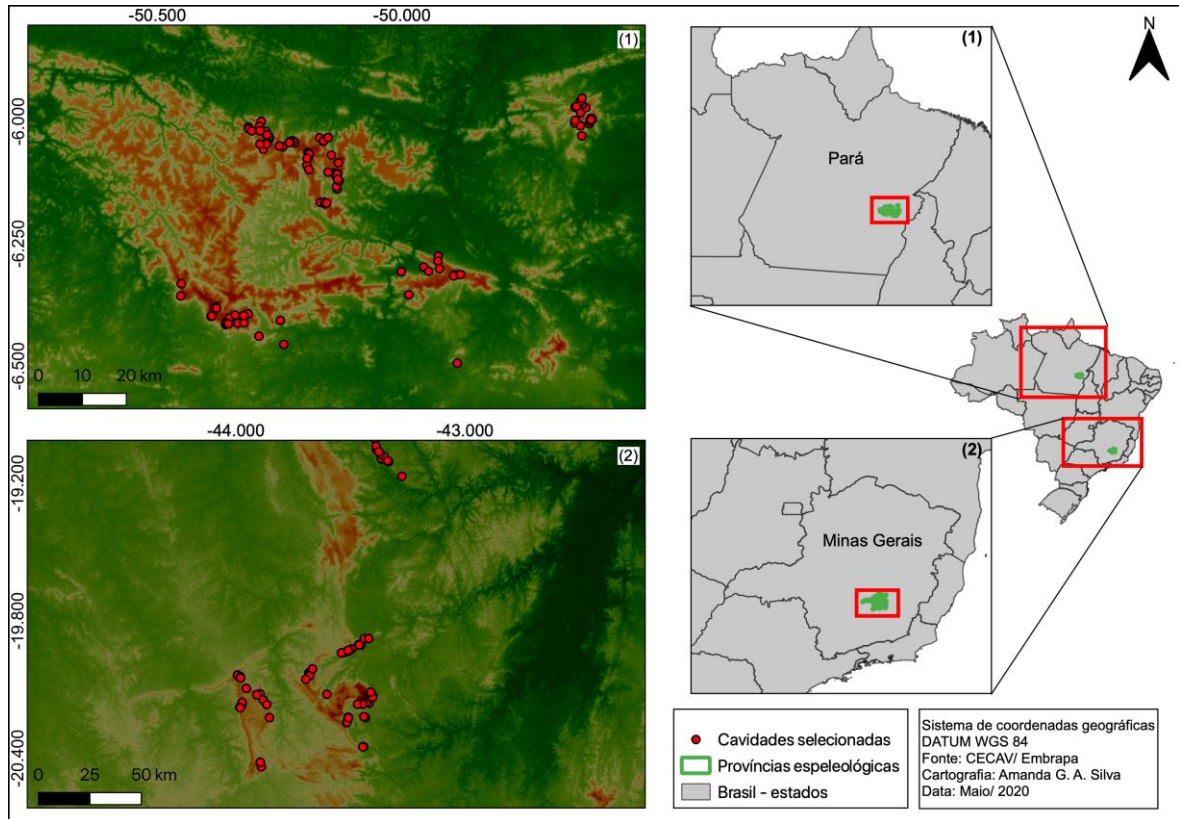


Figura 1.1 - Mapa de localização das cavidades nas áreas de estudo: Serra dos Carajás - PA (1) e Quadrilátero Ferrífero – MG (2).

2 ESPELEOGÊNESE DAS CAVIDADES FERRÍFERAS

Muito embora as cavidades hospedadas em litologias ferríferas sejam reportadas em diferentes zonas intertropicais e descritas na literatura desde o início do século XIX, o interesse em melhor compreender os processos envolvidos na origem de feições tão específicas dos ambientes ferríferos apenas tornou-se recorrente nos últimos anos. Este desinteresse provavelmente associa-se às pequenas dimensões e características estéticas destas feições que muito se diferem da beleza cênica e grandiosidade contemplada no carste tradicional (Auler e Piló, 2005). Nas cavernas ferríferas os exuberantes espeleotemas são raros e os salões e condutos geralmente muito diminutos.

No Brasil, as pesquisas científicas já alcançaram importantes descobertas no âmbito da construção do conhecimento referente à gênese e evolução das cavidades em litologias ferríferas (Auler e Piló, 2005; Dutra, 2015; Calux *et al.*, 2019). Entretanto, ainda há um longo caminho a se trilhar, pois nas últimas décadas a crescente expansão das atividades minerárias no país fomentou a ampliação de estudos ambientais e, por consequência, a geração de um volume significativo de dados a respeito das cavidades ferríferas. Além disso, é possível afirmar que o Brasil, segundo maior produtor de minério de ferro do mundo (USGS, 2019), é naturalmente detentor de um dos maiores patrimônios espeleológicos nessa litologia. Segundo Auler e Piló (2005), a alta densidade de cavidades prospectadas predominantemente no Quadrilátero Ferrífero – MG e na Serra dos Carajás – PA até o momento, permite inferir que a ocorrência das mesmas seja comparável ou superior às áreas calcárias, areníticas ou quartzíticas do país.

Apesar da ocorrência generalizada e do crescente avançar no número de estudos e dados, persistem elevados desafios no que concerne à compreensão da morfogênese das cavidades ferríferas. Sobretudo acerca do estágio evolutivo na qual estas feições atualmente se encontram. Predominantemente são consideradas como fósseis, uma vez que normalmente o nível do lençol freático se encontra a dezenas de metros abaixo do desenvolvimento das cavidades. Assim, a maioria das cavernas ferríferas encontram-se isoladas entre si, sendo raros os casos em que existe interconexão hidrológica (Calux e Cassimiro, 2015). Deste modo, ainda que a atual

morfologia das cavidades reflita majoritariamente os processos erosivos estabelecidos em estágios tardios na zona vadosa (Auler e Piló, 2005), e sejam raras as feições hidrológicas ativas em cavidades ferríferas, a existências de paleofeições são relativamente comuns. A presença de marcas de fluxo concentrado no piso e nas paredes, paleoníveis, acúmulo de água e sedimentos, ranhuras de escoamento vertical, entre outros, auxiliam a análise do contexto pretérito no qual as cavernas se desenvolveram e permitem inferir que no passado os processos hidrológicos foram mais ativos (Calux *et al.*, 2019).

Vale ressaltar que as cavidades hospedadas em substratos ferríferos ocorrem em canga, nas formações ferríferas, no contato entre canga e formação ferrífera e nos ferricretes¹. São relatadas diversas possibilidades genéticas para estas feições. Contudo, embora existam diferenças mineralógicas entre as formações ferríferas da Serra dos Carajás em relação àquelas observadas no Quadrilátero Ferrífero, as cavidades em ambas as localidades apresentam características semelhantes (Dutra, 2015). Dentre os principais processos genéticos até então elucidados cita-se sinteticamente a dissolução, lixiviação, erosão, biogênese e a formação por depósito de tálus.

No Brasil, George Simmons (1963) tornou-se o primeiro pesquisador a criar hipóteses espeleogenéticas para cavidades ferríferas, bem como a atribuir importante papel da dissolução no processo. Neste clássico trabalho sobre as cavernas do Quadrilátero Ferrífero, o autor sugere que algumas cavidades sejam resultado de processos dissolutivos, outras oriundas da erosão e possivelmente algumas resultem da combinação de ambos os processos. Desta forma, as cavernas controladas pela erosão seriam provenientes da erosão diferencial do contato entre a canga e as rochas subjacente, enquanto as cavernas de dissolução se formariam nos itabiritos sob a canga, relacionadas às cristas de serra cobertas por canga.

Para as cavidades de erosão, Simmons (1963) defende que uma vez que a inserção da rede de drenagem ocasiona o rompimento da camada de canga formando vales de encostas íngremes, os processos erosivos são estabelecidos sob litotipos

¹ Ao contrário das cangas, que se formam através da acumulação relativa de ferro, os ferricretes são considerados como depósitos de oxihidróxido de ferro estratificados ou depósitos clásticos sedimentares cimentados pela estratificação de oxihidróxido de ferro (Verplanck *et al.*, 2007).

friáveis como filitos, xistos e materiais detríticos. Posteriormente, pequenas cavidades de erosão são criadas a partir do rolamento de fragmentos inconsolidados em encostas acentuadas. Após formadas, estas cavidades são alargadas pela contínua ação abrasiva dos cursos d'água. Quanto à morfologia, o autor afirma que raras as exceções, cavidades de erosão apresentam um único conduto. Este é em geral mais largo do que extenso, pois sua extensão é limitada pela capacidade de suporte da canga. Estas cavernas, lateralmente dispostas em função dos dobramentos, estão geralmente localizadas em posição topográfica baixa, logo abaixo da canga que sustenta as bordas dos vales.

Para as cavernas de dissolução, Simmons (1963) propõe um modelo endogenético no qual os vazios são inteiramente formados no interior do maciço rochoso. O autor atribui a estas cavidades maiores dimensões do que as de gênese erosiva e afirma que, frequentemente, cavidades dissolutivas podem apresentar vários compartimentos internos. Sua entrada, normalmente formada por pequenas aberturas verticais, seria resultado do desabamento da canga a partir de um vazio subjacente. A morfologia e a dimensão destas cavidades seriam possivelmente controladas pelo teor de minerais solúveis, bem como pela disposição do acamamento do itabirito, fator que condiciona a formação da caverna e a direção do fluxo das soluções envolvidas em sua gênese.

Em contrapartida, Auler e Piló (2005), ao estudarem as cavernas em minério de ferro de Capão Xavier no Quadrilátero Ferrífero, propõem que a espeleogênese das cavidades ferríferas se dá em duas etapas, sendo a primeira relacionada aos processos químicos (dissolução) e a segunda à ação dos processos físicos (erosão). Inicialmente, na zona freática da massa rochosa, a atuação da dissolução formaria uma zona de alta porosidade. Com o rebaixamento do nível freático, a matéria friável seria lixiviada para o exterior a partir de processos similares ao "*piping*". Iniciada a etapa erosiva, com o estabelecimento de uma saída para o exterior, os processos físicos se tornariam predominantes. Desta forma, os autores apontam as bordas de topo de serras, encostas íngremes e áreas com quebra de relevo, como os locais onde o gradiente hidráulico referente à zona freática seria mais pronunciado, resultando assim, em situações de maior potencial erosivo da água subterrânea.

Já na região da Serra dos Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará, a primeira referência a estas geofomas deve-se a Tolbert *et al.* (1971) que mencionaram as grandes cavernas descobertas sob a cobertura laterítica em Serra Norte. Para os autores, estas cavidades seriam resultado da lixiviação do minério maciço, filitos e xistos através da percolação das águas superficiais por fraturas. Apesar da descoberta tardia em comparação ao Quadrilátero Ferrífero, atualmente a Serra dos Carajás detém o segundo maior patrimônio espeleológico do Brasil e o maior no que se refere a cavidades hospedadas em litologias ferríferas (CANIE, 2019).

Com o início do cadastramento das cavidades localizadas nas bordas dos platôs de Serra Norte, os trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores do Grupo Espeleológico Paraense – GEP contribuíram para os grandes avanços nos estudos espeleológicos da Serra dos Carajás. Em relatório, Pinheiro *et al.* (1985) relatam os aspectos geoespeleológicos de quatro cavernas localizadas nos platôs de Serra Norte: Gruta dos Anões, Gruta do N1, Gruta do Gavião e Gruta da Onça, além de propor o primeiro modelo espeleogenético geral (Figura 2.1) para as cavidades da Serra dos Carajás (Figura 2.1). Para os autores, o processo espeleogenético se inicia com a dissolução da rocha nas porções superiores do lençol freático, preferencialmente nas zonas de maior fraqueza como planos de falhas e/ou fraturas e locais de notável contraste lito-faciológico e textural. A partir de oscilações do nível hidrostático vinculadas, por exemplo, às variações pluviométricas estacionais ou aos movimentos epirogenéticos, formam-se pequenas cavidades de dissolução isoladas no topo da zona freática e na zona vadosa. Sob condições predominantemente vadosas, a dissolução atua em menor escala e se estabelecem os processos erosivos hidrostáticos no sistema, ampliando gradativamente as proto-cavernas e compondo as galerias e salões. Por fim, a instalação do ambiente vadoso provoca acomodações mecânicas através do abatimento de blocos e formam-se as cavernas (Pinheiro *et al.*, 1985) (Figura 2.1).

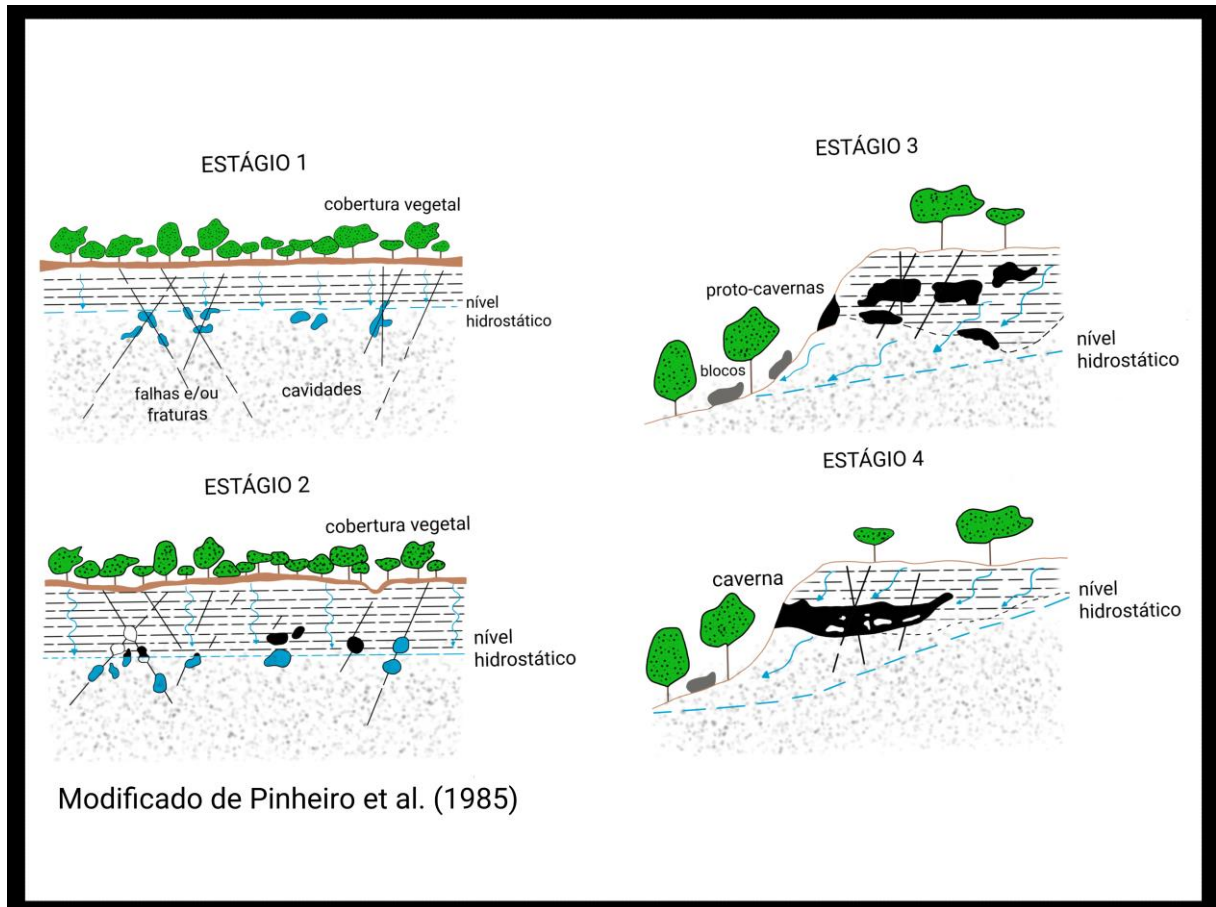


Figura 2.1 - Quadro espeleogenético esquemático para as cavernas da Serra dos Carajás (PA): Estágio 1 – Processo inicial de dissolução da rocha, preferencialmente nos planos de falhas e/ou fraturas e nos locais de marcantes contrastes lito-faciológico e texturais; Estágio 2 – Variações do nível hidroestático. Formação de pequenas cavidades de dissolução, isoladas, no topo da zona freática. Pequenas cavidades em zona vadosa; Estágio 3 – Formação de proto-cavernas na zona vadosa, resultantes da interação do fluxo d'água subterrâneo, intemperismo químico e erosão fluvial nas encostas, sobre a zona previamente preparada pela dissolução inicial; Estágio 4 – Formação de cavernas, a partir de processos de incisão das proto-cavernas com ação contínua do fluxo subterrâneo em direção às encostas e ao nível hidroestático. Travassos (2021) modificado de Pinheiro *et al.* (1985).

O modelo espeleogenético pioneiro para as cavernas ferríferas da Serra dos Carajás de Pinheiro *et al.* (1985) foi aprimorado em Pinheiro e Maurity (1988). Segundo esses autores, as cavidades encontram-se inseridas logo abaixo da carapaça ferruginosa e sua gênese é caracterizada por duas fases. Na primeira, diretamente relacionada à formação da canga, predominam os processos químicos. Em condições de pH típicas, os elementos ferro, alumínio e silício coexistem, ocasionando a geração de complexos alumino-ferrosos, argilo-minerais e materiais residuais instáveis. Já no segundo estágio, relevantes alterações nas condições ambientais, como movimentos epirogenéticos e/ou variações climáticas, modificam o relevo e permitem a prevalência dos processos físicos sobre a rocha anteriormente

intemperizada. Como consequência, as variações do nível freático resultantes contribuem para a expansão de pequenas cavidades formadas por agentes químicos no primeiro estágio (Pinheiro e Maurity, 1988), conforme Figura 2.2.

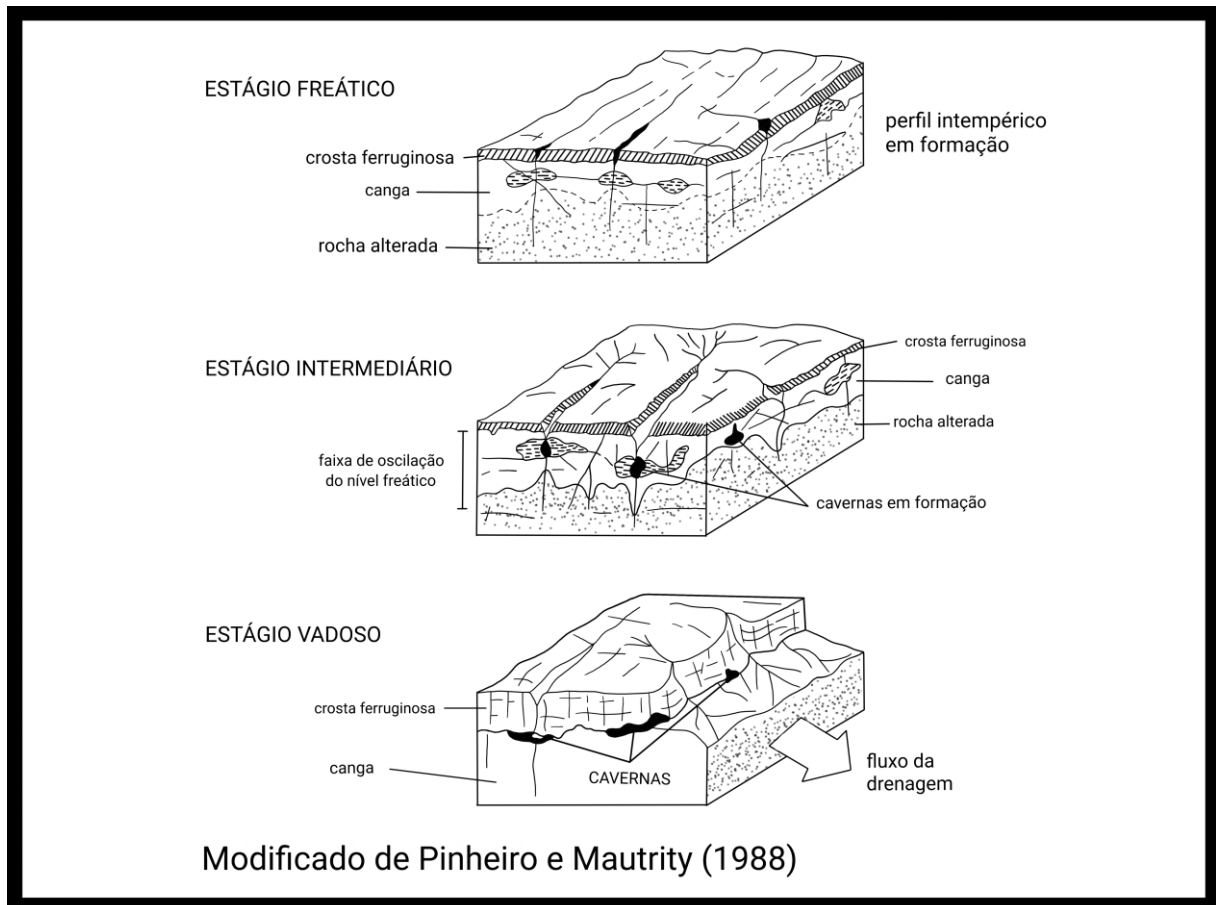


Figura 2.2 - Esquema evolutivo para as cavernas em rochas ferríferas da Serra dos Carajás. 1) Formação da crosta ferruginosa e diferenciação da canga a partir de processos intempéricos sobre rochas variadas. 2) Dissecção do relevo e oscilações do nível freático. Implantação de cavidades subterrâneas em zonas de concentrações de compostos instáveis resultantes dos processos de formação da canga. 3) em regime vadoso, atuação de agentes hidráulicos. Fase de erosão física e desmoronamento de blocos. Travassos (2021) modificado de Pinheiro e Maurity (1988).

Mais tarde, Maurity e Kotschoubey (1995) desenvolveram um detalhado estudo sobre a gênese das cavidades em formações ferríferas, além da geoquímica e mineralogia dos espeleotemas (Figura 2.3). Segundo os autores, a origem das cavernas e feições doliniformes está diretamente relacionada aos fatores estruturais e à existência de zonas de baixa densidade. Sinteticamente, foram descritos os três estágios espeleogenético (Figura 2.3): (i) no primeiro, as discontinuidades estruturais como fraturas e fissuras condicionam a percolação de solução aquosa e a

consequente instalação de um sistema orientado de vazios reticulados. Além disso, nessa etapa, o ferro e o alumínio parcialmente mobilizados na crosta migram para zonas mais profundas do manto de alteração; (ii) o segundo estágio é marcado pelo surgimento de estruturas do tipo *boxwork* a partir do preenchimento das fraturas e fissuras na interface crosta-saprolito por oxi-hidróxidos de ferro e alumínio; (iii) no terceiro e último estágio, a ação da dissolução e eluviação lateral da matriz argilosa originam zonas de baixa densidade sujeitas ao colapso parcial e formação de cavidades.

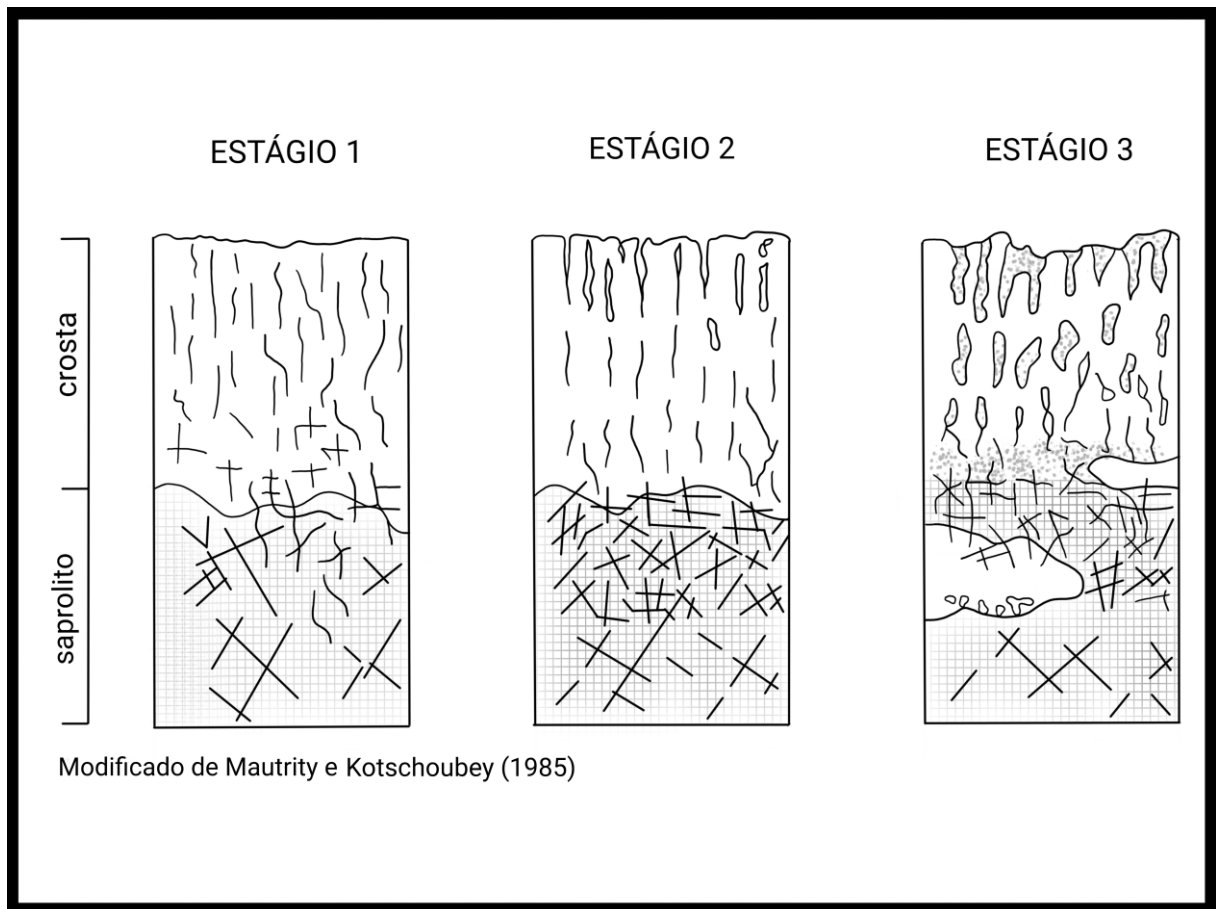


Figura 2.3 - Evolução da zona de baixa densidade na interface crosta- saprólito e formação de cavernas: Estágio 1 – Percolação de soluções aquosas ao longo de fissuras e fraturas, e desenvolvimento de um sistema reticulado de vazios. Mobilização de ferro e alumínio; Estágio 2 – Preenchimento de fissuras e fraturas na interface crosta-saprolito por óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, gerando estruturas do tipo *boxwork*; Estágio 3 – Desenvolvimento da zona de baixa densidade através da dissolução e da eluviação lateral da matriz argilosa. Colapso parcial desta zona e formação de cavidades. Travassos (2021) modificado de Maurity e Kotschoubey (1995).

Devido ao caráter pouco solúvel dos óxidos de ferro, é importante ressaltar dois processos distintos que viabilizam a desestabilização, dissolução do minério de ferro:

os processos de mineralização das formações ferríferas e a bio-redução de Fe(III) sólido para Fe(II) aquoso.

Referente aos processos de mineralização, estudos recentes sugerem que a ocorrência de cavidades nas formações ferríferas encontra-se diretamente relacionada aos depósitos de minério de ferro de alto teor (Pilé e Auler, 2009; Calux *et al.*, 2019). Seja a partir do enriquecimento residual supergênico ou ligado ao processo hipogênico (Dorr, 1964), a mineralização associa-se à formação das zonas de baixa densidade proposta por Maurity e Kotschoubey (1995) (Calux *et al.*, 2019).

Quando expostas à superfície, as rochas estão sujeitas à mobilização e reconcentração de minerais, elementos e substâncias químicas a partir do intemperismo. Após um longo período de contínua atividade, estas transformações no corpo rochoso podem gerar depósitos supergênicos. O processo inicia-se na zona de oxidação², onde a intensa circulação de água meteórica possibilita a hidratação, oxidação e hidrólise dos minerais. Por conseguinte, as substâncias mais solúveis são lixiviadas para fora do sistema, resultando no rebaixamento da superfície, enquanto as substâncias insolúveis passam a se concentrar residualmente (Biondi, 2003). Ribeiro (2003), demonstra em seu trabalho sobre o enriquecimento supergênico dos depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, que a lixiviação do quartzo ou carbonato em solução pode resultar na redução de 30% a 40% do volume original da rocha, com acúmulo de teor médios de Fe próximo a 66%.

Por outro lado, no modelo de mineralização hipogênico proposto por Clarck e Schmidt (1986) e Schmidt e Clarck (1994) para a província de Hamerley na Austrália, a incorporação dos fluidos se dá a partir do fluxo termal ascendente originado em partes profundas da crosta e transportado através de zonas de cisalhamento criadas no processo de orogenia do pacote sedimentar. Para os autores, a percolação de fluidos quentes pelas formações ferríferas possibilitou a lixiviação da sílica e a deposição de ferro solubilizado em arranjos favoráveis.

McFarlane e Twidale (1987), ao investigarem a gênese das feições cársticas

² Zona do perfil laterítico composta pela duricrosta e a zona manchada (front de ferruginização, que marca a posição futura da duricrosta). Com a progressão da lixiviação na zona de oxidação, a superfície sofre rebaixamento e o front de ferruginização avança para baixo, resultando no aumento da espessura da duricrosta (Biondi, 2003).

associadas a perfis lateríticos de ambientes tropicais afirmam que as explicações clássicas de dissolução e colapso são insatisfatórias, uma vez que estes perfis se apresentam extremamente lixiviados e seus materiais residuais detêm solubilidade muito baixa. À vista disto, os autores sugerem que a atuação de microorganismos na dissolução dos óxidos de ferro dispõe forte potencial explicativo para a gênese destas geoformas.

De fato, na última década, avanços significativos na compreensão do papel desempenhado por microorganismos redutores no processo bioespelogenético de dissolução dos substratos ferruginosos vêm sendo alcançados (Parker *et al.*, 2013; Parker *et al.*, 2019). Impulsionados pela incoerência entre as baixas taxas de solubilidade e erosão dos componentes do itabirito e os altos níveis de Fe dissolvido constatados em poças e fluxos de água corrente, Parker *et al.* (2013) investigaram no Quadrilátero Ferrífero a relação entre a redutibilidade microbiana de fases de Fe (III) com a gênese das cavernas ferruginosas. Partindo da hipótese de que o carbono orgânico dissolvido serviria como doador de elétrons para o crescimento das bactérias redutoras, que por sua vez utilizam os óxidos Fe (III) como receptores de elétrons, a mobilização do Fe como Fe (II) solúvel viabilizaria a transferência de massa das rochas a partir da percolação das águas subterrâneas. Por consequência, possibilitaria a criação das cavidades em um processo semelhante à dissolução das rochas calcárias. Como resultado, os autores concluem que a dissolução reductiva é possível em todas as fases de Fe (III) das formações ferríferas, mas a maior intensidade do processo bioreductor estaria associado aos graus de cristalinidade mais baixos. Desta forma, as maiores taxas de dissolução de Fe (III) foram observadas na canga, seguido pelas formações ferríferas bandadas e por último nos depósitos de minérios de ferro. Tal resultado sugere possível influência das bactérias redutoras na gênese das cavidades nas zonas de interface canga/itabirito (Parker *et al.*, 2013). Por outro lado, Parker *et al.* (2017) constatam que as condições ambientais dos locais de significativa redução de Fe (III) na possível formação das cavidades ferríferas são muito diferentes das consideradas no estudo anterior. Por conseguinte, os pesquisadores cultivaram bactérias redutoras buscando replicar as condições físico-químicas do ambiente cavernícola. Foram consideradas as propriedades de pH, química orgânica e óxidos de Fe (III) como aceitadores de elétrons e concluíram que a atividade destas bactérias nas cavidades é muito mais complexa do que o

inicialmente previsto.

Além da importância atribuída aos microorganismos redutores, é relevante ressaltar a contribuição da megafauna pleistocênica nos processos de biogênese/ampliação de cavidades ferríferas observadas na Serra dos Carajás e no Quadrilátero Ferrífero. As paleotocas (Figura 2.4) são escavações icnofósseis³ associadas à habitação e refúgio de tatus e preguiças gigantes, dentre outros animais (Ruchkys *et al.*, 2014). A viabilização deste processo espeleogenético implica na presença de rocha ou saprolito friável, a exemplo de rochas máficas decompostas recobertas por canga e as cangas químicas, que seriam materiais considerados passíveis de escavação pelos animais (Dutra, 2015).

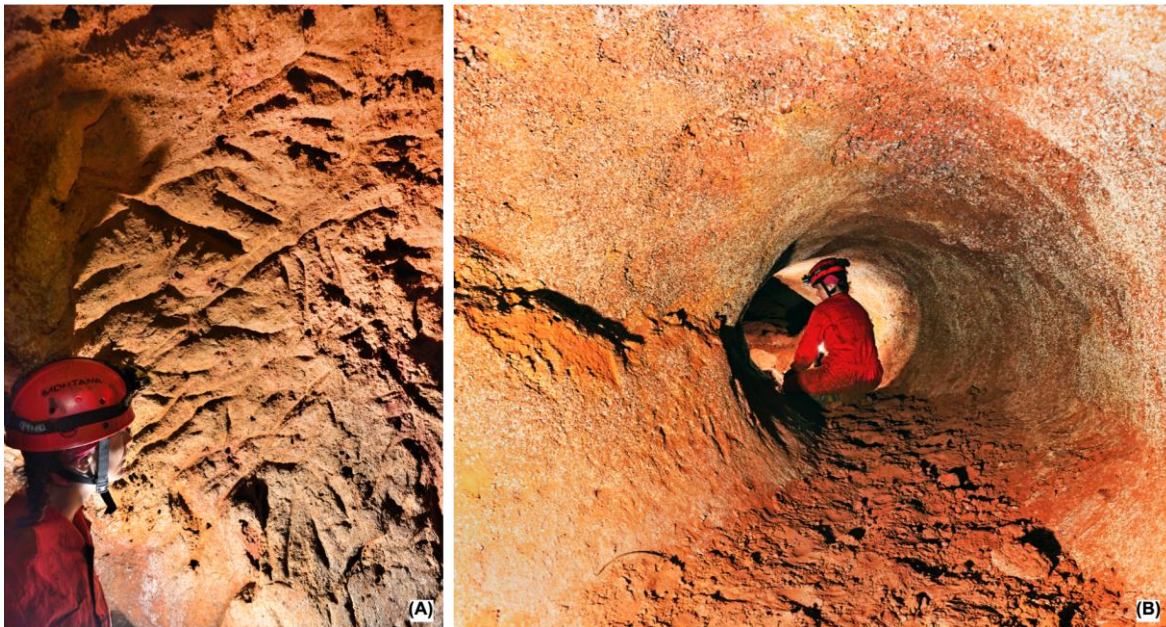


Figura 2.4 – Paleotoca localizada na província espeleológica do Quadrilátero Ferrífero. (A) Marcas das ranhuras de escavações; (B) conduto da cavidade. Fotos: Vitor Moura e Luciana Alt.

Como anteriormente apresentado, diversos autores consideram os processos erosivos como um importante estágio evolutivo para as cavidades ferríferas (Auler e Piló, 2005; Pinheiro *et al.*, 1985; Pinheiro e Maurity, 1988; Maurity e Kotschoubey, 1995). Entretanto, a ação erosiva por si só também pode ser responsável por desenvolver tais feições. Não há como negar que muitas cavidades se formam no contato geológico da canga com a formação ferrífera bandada (Auler e Piló, 2009).

³ Registros geológicos de atividades biológicas dos seres no passado. São exemplos de icnofósseis as tocas, pegadas, ovos e coprólitos fossilizados.

Estes ambientes favorecem a erosão diferencial do substrato ferruginoso em função da heterogeneidade de resistência à atividade intempérica. Dentre os processos erosivos que atuam na gênese e ampliação de cavidades ferríferas, cita-se a erosão em cabeceiras de drenagem, margem de drenagem (Figura 2.5), bordas de lagoas e por cachoeiras (Figura 2.6) (Dutra, 2015).

Segundo Dutra (2015), a formação de cavidades a partir da erosão em cabeceiras de drenagens ocorre em áreas de alto e médio gradiente hidráulico, onde a erosão mecânica da água subsuperficial é potencializada. A retirada de material ocorre de jusante para montante e devido à erosão diferencial, a canga como material mais resistente permanece, enquanto substratos de contato mais friáveis são removidos (hematitas ou formações ferríferas friáveis, solo ou minérios menos resistentes). Referente às cavidades de erosão nas margens de drenagens, a gênese ocorre principalmente nas curvas dos rios a partir do solapamento das margens e desmoronamento do substrato subjacente. Desta forma, estas cavidades são caracterizadas como abrigos de largas aberturas e pequeno desenvolvimento. Assim como as drenagens, as margens de lagoas também representam ambientes propícios à gênese/ evolução das cavidades ferríferas. É característico que estas geoformas apresentem maior amplitude da cavidade na linha de água relacionada à erosão ou oxidação de suas paredes. De outro modo, no processo de erosão por cachoeira, o desnível da queda proporciona grande potencial erosivo para a desagregação das rochas na base do relevo e, a partir da erosão remontante, progressivamente surgem reentrâncias na rocha formando abrigos. (Dutra, 2015).

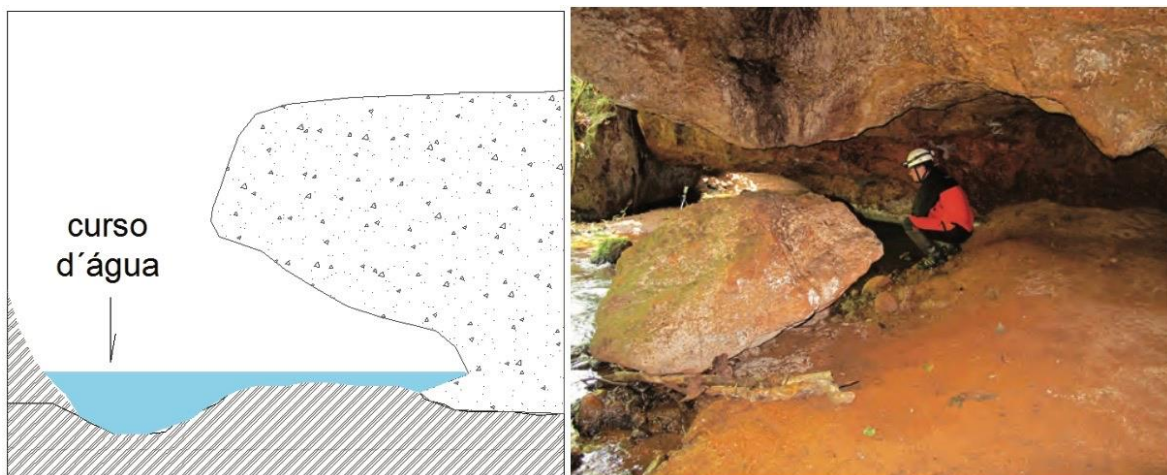


Figura 2.5 - Exemplo de cavidade originada por erosão em margem de drenagem. Fonte: Dutra (2015).



Figura 2.6 - Exemplo de cavidade possivelmente originada a partir de erosão por cachoeira. Modificado de Dutra (2015).

Por fim, outro processo espeleogenético atribuído às cavidades ferríferas consiste na formação por empilhamento de tálus. Os tálus caracterizam-se como depósitos de fragmentos de rochas intemperizadas que se acumulam na base de relevos escarpados (Goudie, 2003). Assumindo que as litologias ferríferas geralmente compõem serras e platôs nas cotas altimétricas mais elevadas em relação à paisagem circundante, pode-se deduzir que estas áreas representam natural fonte de sedimentos para a formação de depósito de tálus. A queda e o empilhamento de grandes matacões nas quebras de relevo dos maciços ferríferos geram recessos entre os blocos que podem formar cavernas e abrigos em uma série de espaços vazios interconectados (Figura 2.7) (Auler e Piló, 2011; Pereira *et al.*, 2012).

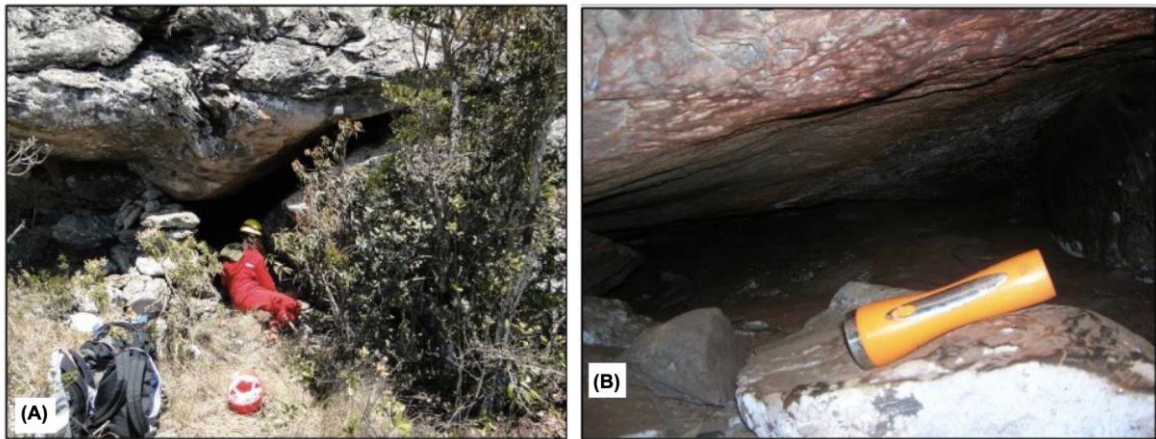


Figura 2.7 – Exemplo de cavidade de tálus na Serra da Piedade, município de Caeté - MG. (A) Entrada da cavidade formada por sobreposição de matacões de itabirito; (B) Teto da caverna. Modificado de Pereira (2012).

3 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

3.1 PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DA SERRA DOS CARAJÁS

A Província mineral e espeleológica da Serra dos Carajás situa-se na porção oriental (sudeste) do cráton Amazonas, sudeste do Estado do Pará (Almeida *et al.*, 1977; Almeida *et al.*, 1981; Santos, 2003; Vasquez e Rosa-Costa, 2008) e representa a maior província mineral do país. Além dos abundantes depósitos de minério de ferro de alto teor, a região também se destaca pela exploração de cobre, ouro, manganês e alumínio. A província é subdivida entre os Domínios Rio Maria (Mesoarqueano) e Domínio Carajás (Neoarqueano), no qual se hospedam as cavidades de interesse (Figura 3.1).

O Domínio Rio Maria é caracterizado como um terreno *greenstone belt* estratigraficamente alocado no Supergrupo Andorinhas. Monteiro *et al.* (2014) detalham a ocorrência de rochas ultramáficas como komatiítos, dunitos e peridotitos, que apresentam texturas características, como cumuláticas e spinifex, na porção base das sequências. Nas porções de topo da sequência destaca-se o predomínio de rochas vulcânicas félsicas e metassedimentares clásticas e químicas (DOCEGEO, 1988). Quanto ao Domínio Carajás, a litoestratigrafia é constituída, em sequência, pelo embasamento distribuído entre os Complexos Xingu e Pium, pela Bacia Carajás, formada pelas sequências metavulcanossedimentares do Grupo Rio Novo, além das rochas do Supergrupo Itacaúnas e Formação Águas Claras (Monteiro *et al.*, 2014).

Monteiro *et al.* (2014) especifica que em relação ao Embasamento Cristalino, o Complexo Xingu é composto por gnaises de protólito tonalíticos a trondhjemíticos, além de migmatitos. Já o Complexo Pium é constituído essencialmente por ortogranulitos máficos a félsicos. Por sua vez, em relação à litoestratigrafia da Bacia Carajás, o Grupo Rio Novo tem como principais litologias os anfibolitos, xistos, metagrauvas, metavulcânicas toleíticas e gabros (Hirata *et al.*, 1982). O Supergrupo Itacaúnas por sua vez é subdividido nos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará e Igarapé Bahia.

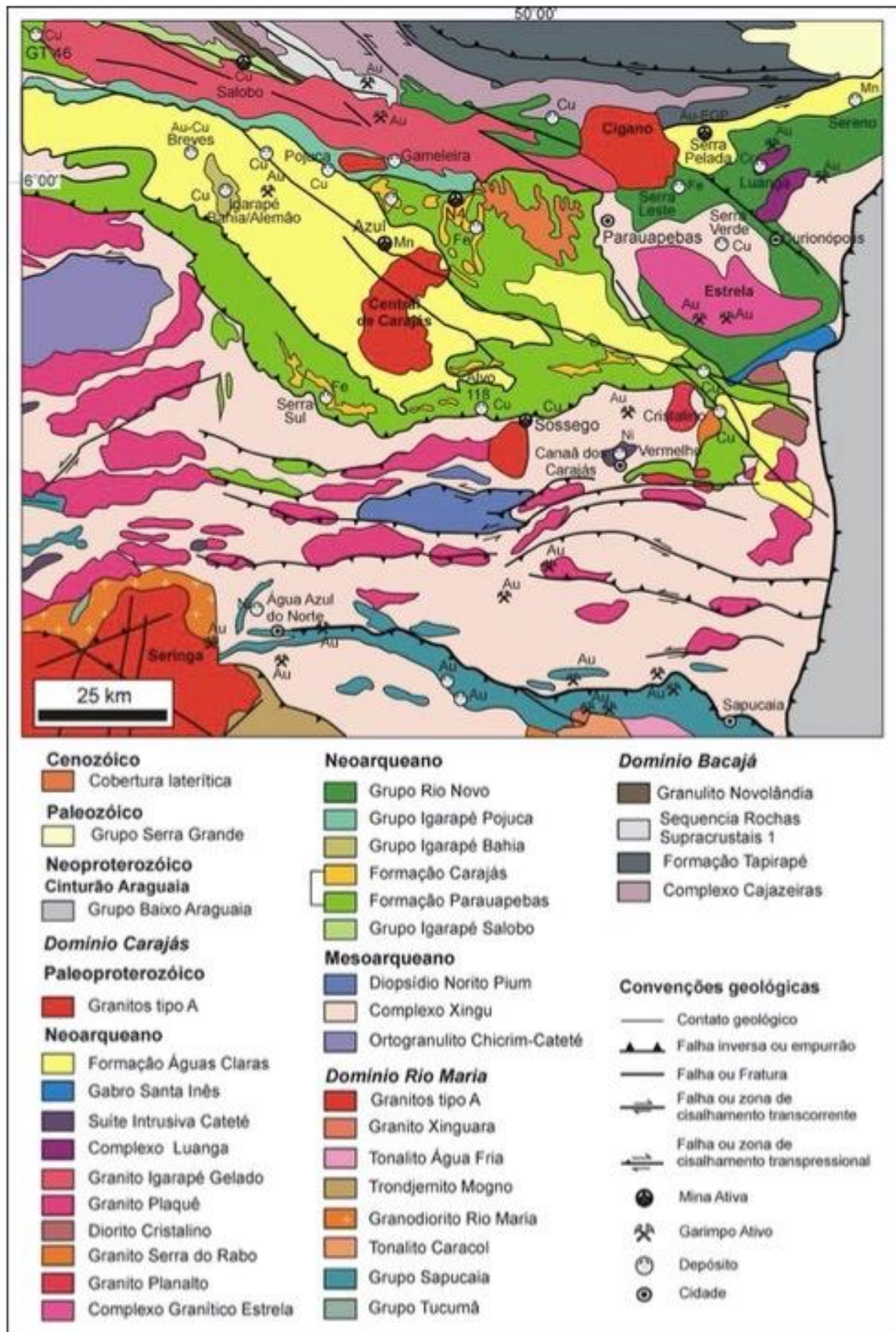


Figura 3.1 - Mapa geológico do domínio Carajás e áreas adjacentes. Fonte: Monteiro *et al.* (2014), modificado de Vasquez *et al.* (2008).

Zucchetti (2007) apresenta a estratigrafia do Grupo Grão Pará dividido de acordo com a proposta de Beisiegel *et al.* (1973), indicando três unidades: sequência paleovulcânica inferior, Formação Carajás e Sequência paleovulcânica Superior. A Sequência paleovulcânica Superior, também designada Formação Parauapebas (Zucchetti, 2007), onde são descritas diferentes fases de magmatismos individualizadas a partir de associações específicas de texturas e estruturas (Zucchetti, 2007). A Formação Carajás por sua vez é bem definida pela presença das formações ferríferas bandadas, cujas bandas de jaspe e óxido de ferro podem variar de meso a micro bandas. A Formação encontra-se estruturada de forma concordante à Formação Parauapebas, sendo descritas espessuras de aproximadamente 220 metros para essa unidade (Macambira, 2003). Este autor ainda destaca a existência de estruturas sedimentares preservadas para além do bandamento composicional. Por fim, a Sequência paleovulcânica Inferior corresponde à Formação Igarapé Cigarra, descrita inicialmente por Macambira *et al.* (1990). A unidade tem contato deposicional concordante com as rochas da Formação Carajás, compondo sequências de rochas Máficas, tufos, sedimentos clásticos e químicos (Macambira, 2003).

Do ponto de vista geomorfológico regional, Boaventura (1974) aponta que a Serra dos Carajás está inserida em duas Unidades Morfoestruturais: i) o Planalto Dissecado do Sul do Pará e; ii) Depressão Periférica do Sul do Pará. O Planalto Dissecado do Sul do Pará é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e por um conjunto de cristas/ picos atingindo em média 700 metros de altitude, interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados comumente adaptados a uma rede de fraturas. Para Boaventura (1974), as formas tabulares de topo aplainado revestidas por carapaça ferruginosa são testemunhos de uma superfície de aplainamento (Figura 3.2) com caimento regional de direção NW. As rochas pré-cambrianas que constituem a Serra dos Carajás são fortemente dobradas e falhadas, caracterizando alguns setores de Serra Norte e Serra Sul como sinclinais suspensos geralmente deformados pela abundante presença de vales encaixados (Boaventura, 1974).

A Depressão Periférica do Sul do Pará, por outro lado, é caracterizada como uma extensa unidade de relevo rebaixado composto por colinas de topo aplainado e cobertura sedimentar inconsolidada, sendo resultado da atuação dos processos

erosivos típicos de clima úmido em conformidade com as estruturas e diferenças litológicas que compõem esta unidade do relevo (Boaventura, 1974).



Figura 3.2 - Superfície de aplainamento, em último plano, observada na região da Serra do Sereno, Serra dos Carajás. Foto: Allan Calux.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (1948), o clima regional da Serra dos Carajás é definido como Aw, sendo este caracterizado como clima tropical com período de seca no inverno (ICMBIO, 2003). A precipitação pluviométrica apresenta variações significativas entre as áreas posicionadas em topografias elevadas e as áreas rebaixadas, chegando a atingir 1.926 mm nas primeiras contra 1.538 mm nas segundas (STPC, 2003; Golder, 2010). Configuram-se dois períodos distintos: uma estação chuvosa que se inicia em novembro e termina em abril, e uma estação seca que inicia em junho e estende-se até setembro. Os meses de maio e outubro representam a transição entre as duas estações. A precipitação média na estação chuvosa chega a concentrar 78% do total anual (STPC, 2003; Golder, 2010). Por outro lado, a média pluviométrica do mês mais seco é inferior a 60 mm. A temperatura média anual é de 23,8°C, com mínima e a máxima absoluta registradas em 12,2°C (maio/1993) e 37°C (setembro/97), respectivamente. A variação média anual da temperatura é pequena, permanecendo entre 0,8 a 1,7°C. O equilíbrio térmico na região é favorecido pela densidade da rede hidrográfica e da massa florestal. A

umidade relativa da região não apresenta muita variação, permanecendo quase sempre a 70%, sendo que nos meses de outubro a maio as máximas chegam a 95% (STPC, 2003; Golder, 2010).

Em relação aos aspectos fisiográficos, ocorrem na área da Serra dos Carajás argissolos, cambissolos, gleissolos, latossolos e neossolos (STPC, 2003). Nas porções mais elevadas da paisagem predominam associações de cambissolo háplico com neossolo litólico. Entre a superfície cimeira das serras e as áreas deprimidas predominam associações de latossolo vermelho-amarelo com cambissolo háplico. Nas porções deprimidas predominam o argilossolo vermelho-amarelo distrófico e eutrófico. A cobertura vegetal é constituída por Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Savana Metalófila e Floresta Aluvial (Figura 3.3). As formações do tipo savana concentram-se sobre as couraças ferruginosas (Porto e Silva, 1989), enquanto as florestais ocupam todos os demais compartimentos da paisagem.



Figura 3.3 - Floresta (esquerda) e savana metalófila (direita), coberturas vegetais típicas da Serra dos Carajás. Fotos: Allan Calux.

3.2 PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) compõe uma região de aproximadamente 7.200 km² localizada no centro-sudeste do estado de Minas Gerais e está situado na borda sul do cráton do São Francisco (Alkimim e Marshak, 1998) (Figura 3.4). Historicamente, esta província mineral tornou-se umas das áreas geologicamente mais estudadas do mundo, principalmente em função dos relevantes depósitos de ouro e ferro encontrados na região.

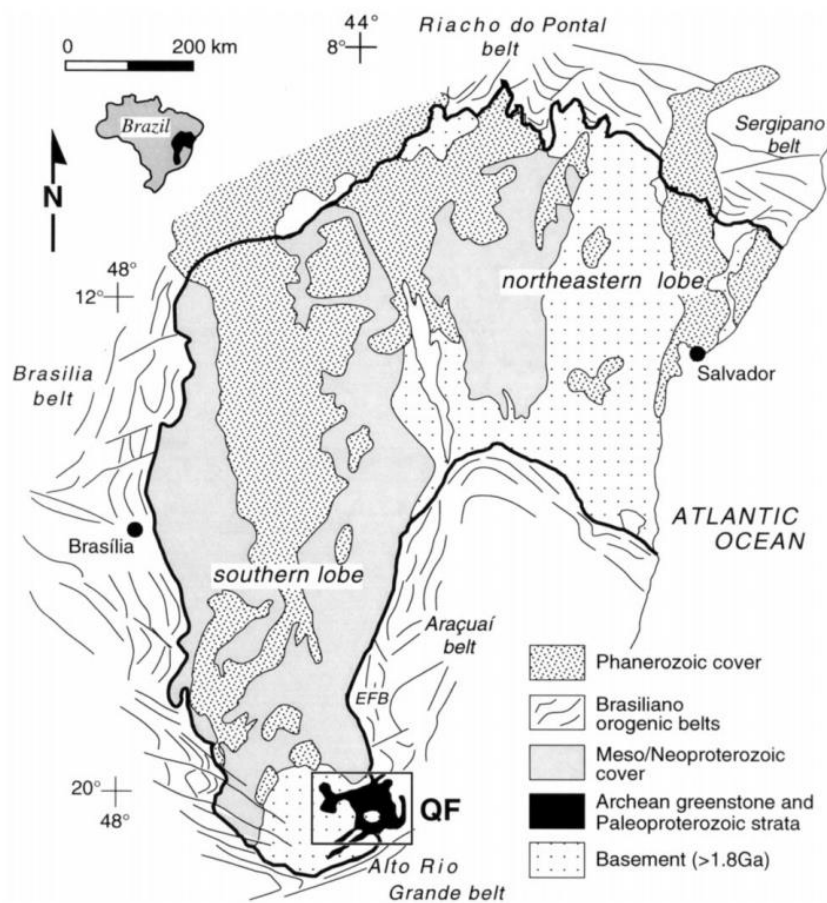


Figura 3.4 – Relação de limites entre o cráton do São Francisco e os limites do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkimim e Marshak (1998).

Em termos de litologia, destacam-se quatro principais conjuntos de unidades (Dorr, 1969; Alkimim e Marshak, 1998) (Figura 3.5 e Figura 3.6): (i) Embasamento granito-gnáissico; (ii) Sequência Arqueana metavulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas; (iii) Sequência metassedimentar palaeoproterozóica do Supergrupo Minas e; (iv) Grupo Itacolomi.

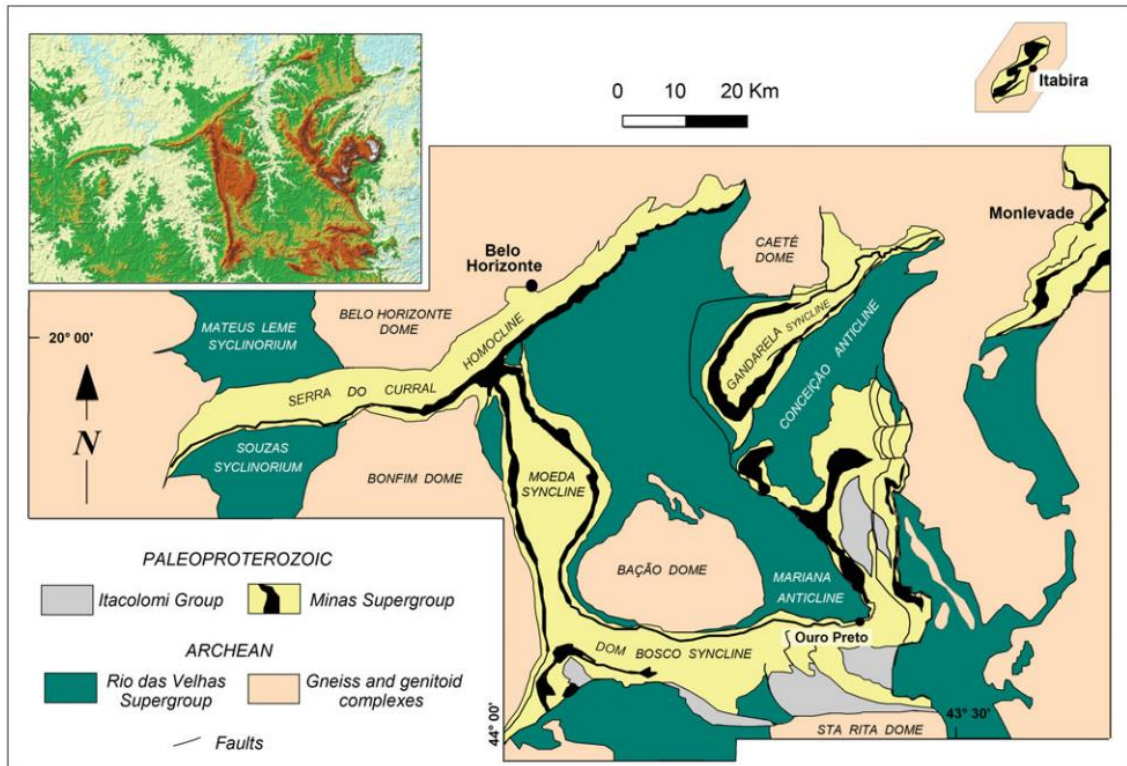


Figura 3.5 – Mapa litológico simplificado (modificado de Dorr, 1969) e modelo digital de elevação do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Heilbron *et al.* (2017).

O Embasamento Cristalino apresenta idade entre 3.2 a 2.7 Ga (Lana *et. al.*, 2013) e é constituído por complexos granítico-gnaissicos que afloram na forma de domos no entorno do Quadrilátero Ferrífero ou no seu interior - Domo do Bação e de Caeté. Está recortado por intrusões máficas a ultramáficas e possui as bordas cisalhadas (Evangelista e Muller, 1986). Sobreposto ao embasamento, o Supergrupo Rio das Velhas é uma seqüência metavulcanossedimentar arqueana do tipo *Greenstone Belt*, com idade aproximada de 2,8 a 2,7 Ga (Machado *et al.*, 1992). É composto por uma grande variedade de litotipos metamórficos com destaque para xistos, filitos metabasaltos, metakomatiítos, rochas carbonáticas, formações ferríferas bandadas, quartzitos, filitos quartzosos, xistos quartzosos e sericíticos e conglomerados (Dorr, 1969). Já o Supergrupo Minas tem idade entre 2.65 e 2.12 Ga e é formado por uma seqüência metassedimentar constituída principalmente por metassedimentos plataformais clásticos e químicos (Dorr, 1969; Alkimim e Marshak, 1998). Destacam-se os seguintes litotipos: quartzitos, metapelitos, formações ferríferas bandadas, rochas carbonáticas, metadiamicititos e cangas. Por fim, o Grupo Itacolomi encontra-se no topo da seqüência e é composto majoritariamente por

quartzitos e metaconglomerados com idades entre 2.0 e 1.75 Ga (Alkimim e Marshak, 1998).

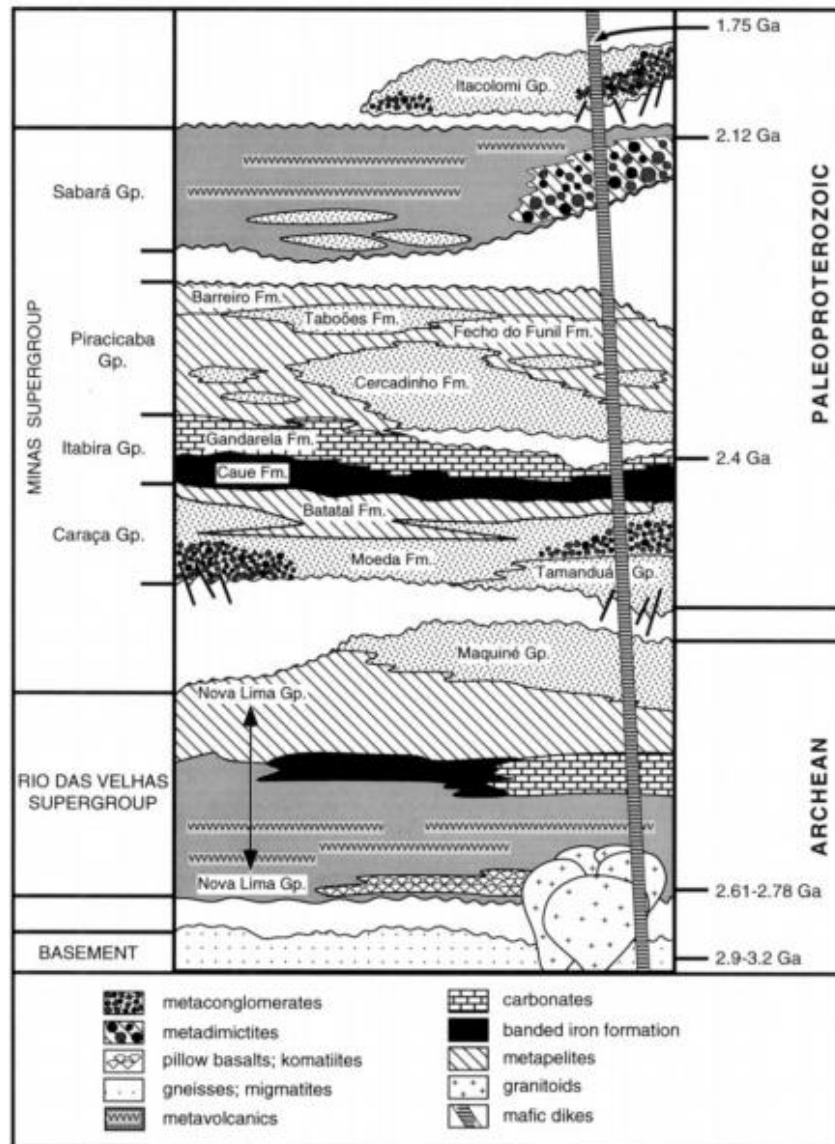


Figura 3.6 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. A esquerda da coluna corresponde à porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, enquanto a direita representa a porção oriental. Fonte: Alkimim e Marshak, (1998).

A evolução da estrutura geotectônica do Quadrilátero Ferrífero associa-se, principalmente, à atuação de dois eventos deformacionais compressivos (Chemale *et al.*, 1994; Alkimim e Marshak, 1998): (i) o Tranzamazônico (2,2 – 2 Ga) de tendência NW a SE e; (ii) Brasileiro (630 – 520 Ma), cuja orientação aproxima-se de E a W. O primeiro afetou as unidades supracrustais e granito-gnáissicas ao longo da era

Paleoproterozóica, enquanto o segundo além de afetar todas as unidades anteriores, também atingiu as rochas supracrustais do Espinhaço Meridional e da bacia sedimentar do São Francisco na era Neoproterozóica (Chemale *et al.*, 1994). É importante ressaltar que a ocorrência de ambos eventos favoreceram a elevação de toda a região levando ao início do contínuo processo erosivo estabelecido no Quadrilátero Ferrífero (Salgado e Carmo, 2015).

A configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero é conhecida pelos seus limites grosseiramente desenhados em um sistema quadrado de cristas compostas por quartzitos, itabiritos e cangas nas posições topográficas mais elevadas – que geralmente superam os mil e duzentos metros e podem alcançar os dois mil em relação ao nível do mar - em contraste às depressões formadas nos granitos, gnaisses, xistos e filitos que se situam geralmente abaixo dos mil metros (Figura 3.7) (Medina *et al.*, 2005). Para Varajão (1991), o Quadrilátero Ferrífero é composto por um mosaico de províncias geomorfológicas cuja variabilidade da declividade e altimetria das vertentes está diretamente relacionada às diferentes condições litotectônicas. Desta forma, apesar de todo o conjunto regional ser resultado de um soerguimento tectônico (Medina *et al.*, 2005), a evolução da paisagem foi condicionada pela erosão diferencial dos substratos (Salgado, 2006), resultando em pequenas superfícies de erosão litologicamente controladas que possuem altitudes que variam dos 800 até os 2000 metros. Entre essas superfícies e ao longo do contato entre os diferentes litotipos abundam escarpas. Estas escarpas também estão relacionadas ao relevo dobrado antigo que sustenta uma paisagem invertida, onde as sinclinais estão suspensas e as anticlinais foram escavadas (Salgado e Carmo, 2015).



Figura 3.7 – Contraste da configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero. Foto: André Salgado.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (1948), o clima do Quadrilátero Ferrífero caracteriza-se predominantemente como Cwa. Descrito como temperado-quente com duas estações são bem definidas: verão chuvoso e inverso seco (Silva, 2007). A temperatura média anual é de 20,1°C enquanto a precipitação pluviométrica atinge média anual entre 1.024 e 1.744mm com chuvas concentradas entre outubro a março (Behling e Lichte, 1997). Tanto as características pluviométricas e de temperatura tendem a se alterar com a altitude local.

De maneira geral, as propriedades fisiográficas de solo e vegetação do Quadrilátero Ferrífero são condicionadas pela variabilidade litológica, topográfica e de altitude (Figura 3.8). Nas áreas mais elevadas, ocupadas por quartzitos e formações ferríferas, predominam os neossolos litólicos, enquanto nos ambientes de maior declividade encontram-se os cambissolos e nas áreas mais deprimidas os latossolos (Varajão *et al.*, 2009). Referente à vegetação, nas maiores altitudes sobre os quartzitos e as formações ferríferas prevalecem os campos rupestres e nas menores,

sobre as demais litologias, o cerrado e as florestas semidecíduais (Behling e Lichte, 1997).



Figura 3.8 - Vegetações típicas do Quadrilátero Ferrífero. (A) Campo rupestre; (B) cerrado e (C) floresta semidecidual. Fotos: André Salgado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa se iniciou em gabinete com levantamentos cartográficos e revisão bibliográfica de obras nacionais e internacionais. Esta etapa preliminar objetivou definir os principais modelos espeleogenéticos propostos para as cavidades ferríferas no Brasil. Em paralelo visou levantar os aspectos geológicos, pedológicos, climáticos e biológicos que condicionam a evolução da geomorfologia regional nas províncias da Serra dos Carajás – PA e do Quadrilátero Ferrífero - MG e, por consequência, das cavidades nelas hospedadas. Adiante, também foram consultados relatórios técnicos e documentos voltados ao licenciamento ambiental, tendo em vista que grande parte dos dados espeleológicos de cavidades ferríferas atualmente provém destes tipos de trabalhos.

Finda esta primeira etapa, iniciou-se a seleção da amostra de cavidades. Esta seleção levou em consideração a disponibilidade de mapas topográficos, bem como relatórios espeleológicos descritivos, tanto na literatura acadêmica, quanto em estudos ambientais. Isto foi feito para que fosse possível obter as informações quantitativas e qualitativas necessárias para a realização do cálculo dos parâmetros morfométricos. Deste modo, foi construído um banco de dados composto por 2.871 mapas espeleotopográficos dos quais extraiu-se uma amostra aleatória simples de cavidades distribuídas nas duas províncias espeleológicas. O número 227 se justifica pois alcança um nível de confiança de 95% e erro amostral de 5%. O sorteio desta amostra resultante do banco de dados, foi realizado através do comando **=ALEATÓRIOENTRE(1;2.871)** no Excel (Microsoft Office).

Também a partir da revisão bibliográfica de estudos em análises morfométricas previamente aplicados a cavidades naturais de outras litologias, foram selecionados oito (8) parâmetros para teste de aderência nas cavidades ferríferas, a saber: densidade de passagens, índice de complexidade horizontal, índice de redondeza, cobertura areal, volume específico, taxa A/P, taxa S/L e taxa EW/IW. O Quadro 4.1 apresenta a fórmula/método de cálculo de cada um deles. Para as medições em mapa, utilizou-se o software AutoCAD (AutoDESK) e o cálculo das demais fórmulas foi realizado no Excel (Microsoft Office). Além dos parâmetros apresentados, também foram considerados os dados espeleométricos referentes à projeção horizontal, desnível, área e volume, uma vez que o cálculo de parte das fórmulas depende destas

informações. Estes valores foram obtidos nos próprios mapas topográficos das cavidades selecionadas.

Quadro 4.1 - Descrição dos parâmetros morfométricos designados.

Parâmetro	Abreviação	Cálculo	Autor
Densidade de passagens	$D_{m.p}$	PH / A_{ret}	Frumkin e Fischhendler (2005)
Índice de complexidade horizontal	H_{ci}	PH / S	Piccini (2011)
Índice de redondeza	I_r	$A_{cav} / A_{c.mín}$	Supostamente inédito
Cobertura areal	CA	A_{cav} / A_{ret}	Frumkin e Fischhendler (2005)
Volume específico	V_{esp}	V_{cav} / PH	Klimchouk (2006)
Taxa A/P	AP_r	A_{cav} / P_{cav}	Roth <i>et al.</i> (2006)
Taxa S/L	SL_r	S / L	Piccini (2011)
Taxa EW/IW	EW/IW	EW / IW	Piccini (2011)
Projeção Horizontal	PH	Retirado do mapa	Autores do mapa
Desnível	D	Retirado do mapa	Autores do mapa
Área	A	Retirado do mapa	Autores do mapa
Volume	V	Retirado do mapa	Autores do mapa

Descrição das Abreviações

A_{ret} - Área do retângulo mínimo que circunscreva a cavidade;

S – Medida do maior eixo do retângulo que circunscreva a cavidade;

A_{cav} – Área da cavidade;

$A_{c.mín}$ - Área do menor círculo que circunscreva a cavidade;

V_{cav} - Volume da cavidade;

P_{cav} – Perímetro da cavidade;

L – Medida do menor eixo do retângulo que circunscreva a cavidade

EW – Medida da entrada principal da cavidade;

IW - Medida da maior largura constatada na cavidade.

Densidade de passagens - Frumkin e Fischhendler (2005)

A densidade de passagens $D_{m,p}$ caracteriza-se pela razão entre a projeção horizontal (PH) da cavidade e a área do retângulo que circunscreve a caverna (A_{ret}). O cálculo deste parâmetro permite separar as *chamber caves*, das cavernas labirínticas. Nas *chamber caves*, a densidade de passagens tende a ser relativamente baixa, uma vez que o salão normalmente compreende toda a extensão da cavidade. Em contrapartida, as cavernas labirínticas comumente resultam em uma alta densidade de passagens.

$$D_{m,p} = PH / A_{ret}$$

Índice de complexidade horizontal – Piccini (2011)

O índice de complexidade horizontal pode conceder indicativos a respeito das características hidrodinâmicas de fluxo subterrâneo durante a espeleogênese. O parâmetro é calculado pela relação entre a projeção horizontal da cavidade (PH) e o valor do maior eixo do retângulo que circunscreva a mesma (S). Utilizado por Piccini (2011) para análise de cavidades carbonáticas, o autor afirma que normalmente, valores altos, ou seja, maiores que 10, podem se relacionar às cavernas labirínticas de fluxo artesianos (Klimchouk, 2003). Os valores médios seriam típicos de grandes complexos de padrão hierárquico vadoso de passagens, que se conectam abaixo em um coletor principal. Já os pequenos valores referem-se às pequenas cavidades.

$$H_{ci} = PH / S$$

Índice de redondeza – Supostamente inédito

O índice de redondeza associa a área da cavidade (A_{cav}) à área do menor círculo que a circunscreva ($A_{c.mín}$). Desta forma, quanto mais o resultado se aproximar de um, mais circular é a morfologia da feição.

$$I_r = A_{cav} / A_{c.mín}$$

Cobertura Areal – Frumkin e Fischhendler (2005)

A cobertura areal equivale à razão entre a área da própria caverna (A_{cav}), com a área do retângulo que circunscribe a mesma (A_{ret}). O resultado deste cálculo proposto por Frumkin e Fischhendler (2005) para caracterizar as duas morfologias típicas de cavernas isoladas, se aproxima de 1 (relativamente alto) quando as cavidades se referem às “*chamber caves*”, ou seja, cavidades compostas por um único salão. Por outro lado, quando se trata de uma caverna labiríntica, o cálculo apresenta valor referente baixo. A área do retângulo (A_{ret}) foi calculada no software AutoCAD.

$$CA = A_{cav} / A_{ret}$$

Volume Específico - Klimchouk (2006)

A partir da relação entre volume (V_{cav}) e projeção horizontal (PH), que representa uma área transversal média da feição, é possível caracterizar as dimensões típicas do sistema de passagens da caverna.

$$V_{esp} = V_{cav} / PH$$

Taxa A/P – Roth *et al.* 2006

A taxa A/P proposta por Roth (2006), consiste em correlacionar a área (A_{cav}) com o perímetro (P_{cav}) das cavernas. Foi inicialmente pensada para as cavidades carbonáticas costeiras em ilhas de Bahamas. A área e perímetro foram as medidas mais utilizadas neste estudo para análise geométrica dessas cavidades, pois, segundo a autora, estes valores representam a verdadeira natureza das cavernas. A relação entre área e perímetro nem sempre é linear. Por exemplo, em uma cavidade com vários condutos estreitos e pilares, o perímetro seria maior do que a área, o que costuma ser o caso das maiores cavernas. Por outro lado, nas pequenas cavernas de um único salão e sem pilares, a área e o perímetro tendem a aumentar na mesma proporção.

$$AP_r = A_{cav} / P_{cav}$$

Taxa S/L – Piccini (2011)

Este parâmetro correlaciona o maior eixo da cavidade (S), com seu menor eixo (L). Desta forma, o cálculo circunscreve um retângulo na feição e possibilita compreender se a tendência de desenvolvimento da cavidade é predominantemente linear no caso de resultados elevados, ou difusa em resultados baixos, oportunizando o agrupamento de cavidades similares.

$$SL_r = S / L$$

Taxa EW/IW – Piccini (2011)

A taxa EW/IW representa a correlação entre a entrada principal da caverna e a maior largura da feição. A análise deste parâmetro nas cavidades carbonáticas permite compreender se a caverna foi submetida a epigênese ou hipogênese. Frequentemente, as cavidades epigênicas apresentam entradas maiores e condutos ramificados como os rios de uma bacia hidrográfica. Já as cavernas hipogênicas, de formação oclusas, tendem a apresentar apenas um salão e pequenas entradas resultantes da interceptação da cavidade pela frente de erosão do maciço onde se encontram. Desta forma, normalmente são muito pequenas em função de um salão único ou principal.

$$EWIW = EW / IW$$

Os dados relacionados à litologia, posição na vertente, presença de drenagem perene, presença de corpos d'água no interior das cavidades e evidência de paleotocas, foram extraídos da literatura e de relatórios de licenciamento ambiental. Em relação à aquisição das informações referentes à rede de drenagem, distância das cavernas à drenagem mais próxima e hierarquia das drenagens, utilizou-se a ferramenta de análise hidrológica “*channel network and drainage basins*” do software livre Qgis 3.10.9. Neste processo, adquiriu-se gratuitamente as imagens ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 metros no site *ASF Data Search (NASA)* para elaboração do MDT. A fim de contemplar toda área de interesse, foram utilizados

sete recortes ALOS PALSAR (Quadro 4.2.). Os recortes foram obtidos no *datum* WGS 84 em coordenadas UTM e foram convertidos para o SIRGAS 2000 UTM. Já os arquivos vetoriais no formato *shape file* relativos às cavidades de interesse foram retirados da base de dados do CANIE no site do CECAV-ICMBio, bem como adicionados através do *software* Qgis a partir das coordenadas disponíveis nos próprios mapas espeleotopográficos utilizados.

Quadro 4.2 - Imagens ALOS PALSAR utilizadas.

Distrito Espeleológico	Imagem ALOS PALSAR
Serra dos Carajás - PA	AP_13011_FBD_F7060
	AP_24170_FBD_F7060
	AP_24418_FBD_F7050
Quadrilátero Ferrífero - MG	AP_26956_FBS_F6770
	AP_26956_FBS_F6780
	AP_27204_FBS_F6770
Espinhaço Meridional - MG	AP_27729_PLR_F6810

Como a natureza de distribuição dos dados é desconhecida, eles também foram analisados graficamente, por meio de histogramas, diagramas de caixa (box-plot), gráficos de dispersão, entre outros. O objetivo desta etapa, realizada no *software* *Orange Datamine*, foi buscar padrões que auxiliassem a interpretação dos resultados e o planejamento da análise exploratória dos dados.

Cumprida as etapas de levantamento, seleção e organização dos dados, teve início a análise exploratória, que também foi realizada no *software* *Orange*. A partir da organização dos dados na etapa anterior, construiu-se um fluxo de trabalho com a finalidade de obter uma clusterização baseada nos resultados dos parâmetros morfométricos anteriormente calculados. Neste processo, para obtenção de resultados fiéis às características morfogenéticas das cavidades ferríferas, os parâmetros foram primeiramente testados perante a perspectiva e interpretação das conclusões obtidas pelos respectivos autores. Com a finalidade de acompanhar a coerência dos dados em análise, o comportamento dos índices calculados para as

cavidades foi investigado a partir de gráficos de dispersão, acompanhados da observação dos mapas espeleotopográficos e informações espeleométricas.

Referente ao fluxo de trabalho realizado, com a ferramenta **rank**, foi possível ordenar as variáveis de acordo com sua correlação com o alvo (neste caso uma primeira clusterização utilizando todos os parâmetros de interesse). Desta forma, os parâmetros mais informativos receberam maior pontuação do que aqueles considerados pelo programa como detentores de menos informações relevantes. O conhecimento desta ordem é importante para a posterior compreensão da composição dos *clusters* (grupos).

Com a obtenção do ranqueamento dos parâmetros, aplicou-se a ferramenta **hierarchical clustering**. Este recurso calcula o agrupamento hierárquico dos objetos de uma matriz de distância e os apresenta no formato de um dendrograma. Na atual análise, utilizou-se a métrica euclidiana, que é o conceito matemático que representa a menor distância existente entre dois pontos na Geometria Euclidiana. A ligação (*linkage*) de *ward* configura o método de análise hierárquica de *clusters* selecionado. O funcionamento do método *ward* tem uma ideia semelhante à análise de variância (ANOVA). A função de conexão que determina a distância entre dois *clusters* é calculada de acordo com o aumento na “soma dos quadrados do erro” após a fusão de dois *clusters* em um único agrupamento. O método procura selecionar as etapas sucessivas nos níveis de agrupamento de forma a minimizar a soma dos quadrados do erro em cada etapa.

A definição da quantidade de *clusters* tende a variar de acordo com o objetivo da análise e das características dos dados submetidos à correlação. O *Orange* possui uma ferramenta que objetiva simplificar a determinação do número de *clusters* a partir da avaliação de similaridade dos seus membros, ou seja, o denominado **Silhouette Plot** é uma representação gráfica de consistência e qualidade dos *clusters* de dados. O valor da silhueta varia de -1 a 1 na métrica euclidiana, onde valores próximos de 1 indicam que o objeto compatibiliza bem com seu próprio *cluster* e mal com os *clusters* vizinhos, ou seja, é um agrupamento bem representativo. Por outro lado, se a maioria dos objetos de um *cluster* apresentar um valor de silhueta baixo ou negativo, a configuração do número de grupos deve ser reavaliada, pois este comportamento demonstra que muitos objetos estão na fronteira entre dois *clusters*, podendo ter maior

similaridade com o grupo vizinho do que com o próprio grupo.

Além do *silhouette plot*, a verificação da qualidade dos clusters de cavidades obtidos foi avaliada pela associação de duas ferramentas, sendo elas o *test and score* e a aplicação de seu resultado na *confusion matrix*. O **test and score** funciona como avaliador de resultados a partir do teste de algoritmos de aprendizagem. Como resultado obtemos uma tabela com diferentes medidas de desempenho do classificador e a produção de resultados de avaliação que podem ser utilizados em outras ferramentas de análise de desempenho, como o *ROC Analysis* e a *confusion matrix*.

A análise do *test and score* foi realizada com o método de amostragem de validação cruzada, dividindo o banco de dados em subgrupos, no caso desta pesquisa, dez. Posteriormente, a ferramenta utiliza uma parte do *dataset* para treino e os demais subgrupos para classificação. Ou seja, enquanto se utiliza um grupo como teste, os outros são classificados com base no mesmo. Este processo é realizado com todos os grupos e obtêm-se o *score* em diferentes medidas a exemplo da acurácia da classificação (CA) e a área sob a curva (AUC). A **confusion matrix**, ao receber os dados de saída do *test and score*, apresenta a proporção entre a classe prevista pelo modelo e a atual (verdadeira). A grande vantagem desta ferramenta consiste na possibilidade de visualizar em uma tabela de saída quais objetos foram classificados de maneira equivocada e como.

A utilização da ferramenta **t-SNE** possibilitou a visualização em 2D o que foi interpretado no *silhouette plot*. O t-SNE plota os dados a partir do método de incorporação de vizinho estocástico distribuído por t. É uma técnica de diminuição da dimensionalidade onde os pontos são mapeados por sua distribuição de probabilidade. Uma importante opção de análise da ferramenta é a possibilidade de escolha da medida de perplexidade. A escolha de valores baixos pode evidenciar *clusters* pequenos ou “*sub-clusters*” locais, enquanto a aplicação de valores elevados tende a revelar as relações globais entre os pontos de dados. Neste caso, utilizou-se a representação em baixa perplexidade da ferramenta para seleção e análise de pequenos agrupamentos. A Figura 4.1 abaixo, exhibe o resultado da representação t-SNE de baixa perplexidade utilizada na pesquisa (três), e outro na qual foi preservada a sua estrutura global.

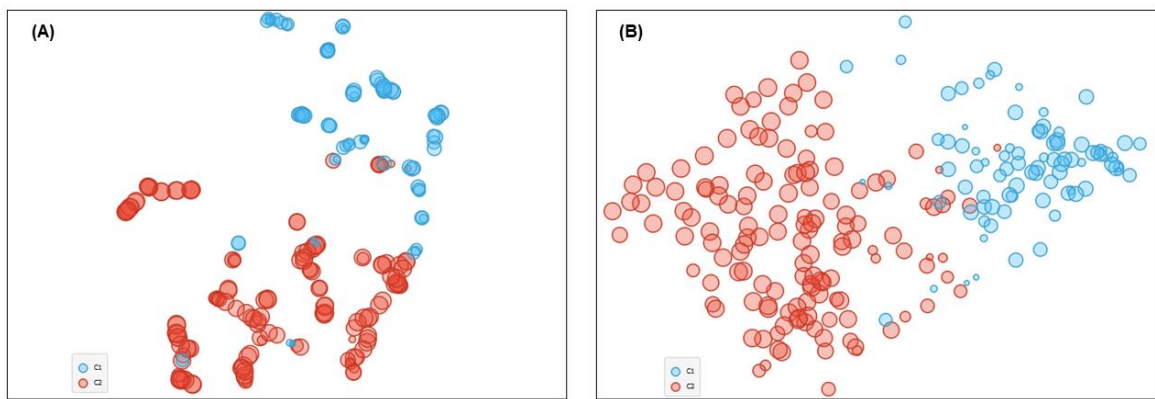


Figura 4.1 – (A) t-SNE em perplexidade baixa; (B) t-SNE com estrutura global preservada.

A avaliação visual dos *sub-clusters* foi realizada a partir da análise de pequenos agrupamentos apresentados pelo t-SNE. Para a definição destes grupos, os objetos foram selecionados visualmente considerando a sua proximidade com os vizinhos. A escolha de realizar a seleção dos subgrupos no t-SNE e não pelo *hierarchical cluster* se deu pela possibilidade de visualizar os objetos que estavam no limite entre os dois *clusters* e agrupá-los com aqueles que possuem maior proximidade, mesmo que de outro *cluster*, caso fosse necessário. Desta forma, 17 *clusters* foram designados inicialmente para análise e, após avaliar por meio da elaboração de fichas contendo os valores dos parâmetros de seus componentes, a litologia, posição na vertente, província espeleológica e características morfológicas gerais dos respectivos mapas espeleotopográficos, alguns clusters foram fragmentados e obteve-se, no fim, um total de 28 *sub-clusters* com quantidade variada de objetos.

Paralelamente, para compreender as características gerais da amostra, elaborou-se uma tabela que, além de conter o cálculo dos parâmetros morfométricos, reuniu informações categóricas a respeito da localização das cavidades, litologia, posição na vertente, presença de drenagem perene, presença de corpos d'água perene e evidência de paleotoca (Quadro 4.3). E, além destas, dados numéricos referentes à distância até a drenagem mais próxima e hierarquia fluvial.

Feita a caracterização dos grupos considerados, foi possível encontrar visualmente semelhanças e divergências entre eles, o que permitiu identificar padrões de morfologia recorrentes nas cavidades da amostra. Posteriormente, os padrões morfológicos foram investigados em relação às suas respectivas características

físicas, de posição, localização e relação com a hidrologia local. Isto foi importante para traçar relações entre forma e possíveis agentes genéticos.

Quadro 4.3 - Descrição dos dados categóricos utilizados.

Atributo	Categorias
Província espeleológica	Quadrilátero Ferrífero
	Serra dos Carajás
Litologia	Canga
	Contato canga/ Formação ferrífera bandada
	Contato canga/ Rocha máfica
	Formação Ferrífera bandada
	Contato formação ferrífera bandada/ Filito
	Ferricrete
Posição na vertente	Topo
	Alta vertente
	Média vertente
	Baixa vertente
Presença de drenagem perene	Sim Não
Presença de corpos d'água perene	
Evidência de possível paleotoca	

Estas propriedades não foram adicionadas ao modelo de análise pois procurou-se manter uma imparcialidade quanto à localização e propriedades físicas das cavidades, visto que o programa poderia utilizá-las para agrupar os objetos ao invés de priorizar os parâmetros morfométricos. Desta forma, apenas os 8 parâmetros foram aplicados e os atributos descritos no Quadro 4.3 foram utilizados para compreender se o grupamento apresenta coerência com as características das feições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROJEÇÃO HORIZONTAL, POSIÇÃO NA VERTENTE E LITOLOGIA

Os primeiros levantamentos quantitativos da pesquisa consistiram em compreender principalmente as características espeleométricas, de posição na vertente e litológicas que prevalecem nas cavidades ferríferas, bem como a comparação destes indicadores nas duas províncias espeleológicas. Vale ressaltar que as análises de espeleometria levaram em consideração a projeção horizontal, área e volume. Como os resultados destas análises foram consideravelmente semelhantes nos três indicadores, a apresentação da projeção horizontal foi priorizada por consistir em um parâmetro de fácil compreensão e comparação. Baseado nas características espeleométricas frequentemente associadas às cavidades ferríferas, três classes de projeção horizontal foram determinadas para comparação, sendo elas: valores de PH até 30 metros, maiores ou iguais a 31 e menores do que 100 metros e, por fim, maiores ou iguais a 100 metros.

O Quadro 5.1 e o Quadro 5.2 relativos à projeção horizontal abaixo, expõem o esperado. A maior parcela da amostra possui até 30 metros, seguido daquelas entre 31 e 100 metros e apenas 19 das 227 apresentam mais de 100 metros de PH, resultando em uma média geral de 44,2 metros de projeção horizontal.

Quadro 5.1 - Distribuição das cavidades da amostra por projeção horizontal.

	Cavidades por Projeção horizontal			Total
	PH até 30m	PH > 31 m < 100 m	PH > 100 m	
Quadrilátero Ferrífero	77 (74%)	20 (19.3 %)	7 (6.7%)	104
Serra dos Carajás	77 (62.6%)	34 (27.6%)	12 (9.8%)	123
Total	154 (67.8%)	54 (23.8%)	19 (8.4%)	227 (100%)

Quadro 5.2 – Características gerais relacionadas à projeção horizontal

	Projeção Horizontal		
	N de Cavidades	PH média (m)	PH total (m)
Quadrilátero Ferrífero	104	32.6 m	3386.2 m
Serra dos Carajás	123	54.1 m	6655.8 m

Ao observar o Quadro 5.2, tem-se a impressão de que a projeção horizontal média das cavernas localizadas na Serra dos Carajás é muito superior à média do Quadrilátero Ferrífero. Porém, a partir da observação de gráficos de dispersão (*scatter plot* e *box plot*), evidenciou-se a presença de um *outlier* na amostra de Carajás. Como resultado, a cavidade S11_0007 foi retirada da análise e substituída nas seguintes etapas de *software* por constituir uma exceção no que diz respeito à sua dimensão e morfologia. A S11_0007 é a maior cavidade em litologia ferrífera (ferricrete) conhecida no mundo. Enquanto essa possui projeção horizontal de 1623 metros, a segunda maior caverna já prospectada no Brasil, a gruta da Piedade, apresenta 365 metros de projeção horizontal (Pereira, 2012), ou seja, é mais de quatro vezes menor. Esta particularidade se deve à sua gênese relacionada à escavação icnofóssil (paleotoca), associado à presença de litologia relativamente friável (máfica/ferricrete). Ao excluirmos a S11_0007 deste cálculo, a projeção média total resulta em 41,3 metros em Carajás.

Quanto à análise da posição das cavidades na vertente, ao comparar os quantitativos no Quadro 5.3 relacionados aos dados da Serra dos Carajás e do Quadrilátero Ferrífero, é possível observar uma relevante tendência de divergência a respeito do domínio morfológico predominante na localização das cavidades. Na Serra dos Carajás, as cavernas se hospedam preferencialmente em alta vertente, enquanto no Quadrilátero Ferrífero, predominam em média vertente. A explicação desta diferença parece vincular-se às diferenças geomorfológicas e geológicas regionais entre as duas Províncias espeleológicas.

Quadro 5.3 – Distribuição das cavidades quanto à inserção no relevo.

	Posição na vertente				Total
	Topo	Alta vertente	Média vertente	Baixa vertente	
Quadrilátero Ferrífero	6 (5.8%)	31 (29.8%)	49 (47.1%)	18 (17.3%)	104
Serra dos Carajás	7 (5.7%)	52 (42.3%)	39 (31.7%)	25 (20.3%)	123
Total	13 (5.7%)	83 (36.6%)	88 (38.8%)	43 (18.9%)	227

As cavidades de Carajás estão predominantemente localizadas nos platôs residuais de topo aplainado e em cristas no Planalto Dissecado do Sul do Pará, lugares com presença marcante da canga que sustenta estas feições nas maiores

altitudes. Por outro lado, nas áreas rebaixadas que contrastam com este ambiente, a limitada presença de canga ou de contato com a mesma, resulta em uma reduzida ocorrência de cavidades ao se comparar com o topo e alta vertente. Quanto ao Quadrilátero Ferrífero, a variedade de províncias geomorfológicas em variáveis altimetrias, bem como diversos períodos de gênese para as cangas, permite um relevo mais escalonado, onde há presença de canga distribuída em domínios além do topo e alta vertente. Desta forma, não é peculiar que a as cavidades se destaquem na média vertente no Quadrilátero Ferrífero.

Tal constatação é evidenciada se considerarmos as correlações entre as litologias canga, contato canga/ formação ferrífera bandada e formação ferrífera bandada, com as posições de topo/ alta vertente) exibido no Quadro 5.4 e no Quadro 5.5. Enquanto nas posições de topo/alta vertente a soma das cavidades de Carajás abrange 48% do total de cavernas da província, o resultado para o mesmo cálculo no Quadrilátero Ferrífero representa 35,6% das feições. Em contrapartida, ao considerar as cavidades localizadas na média vertente, o total das cavernas em canga, contato canga/formação ferrífera e formação ferrífera bandada contempla apenas 30,9% das cavernas de Carajás enquanto para o Quadrilátero ferrífero representa 47,2% do total de cavidades. Por fim, na baixa vertente, os resultados apontam pouca divergência entre as duas localidades.

Quadro 5.4 – Relação entre posição na vertente (média e alta) e principais litologias na Serra dos Carajás.

Topo/ Alta vertente - Serra dos Carajás				
Litologia	Canga	Contato canga/ FFB	FFB	Total parcial
Cavidades por litologia	27 (22%)	15 (12.2%)	17 (13.8%)	59 (48%)
Média vertente – Serra dos Carajás				
Litologia	Canga	Contato canga/ FFB	FFB	Total parcial
Cavidades por litologia	10 (7.3%)	11 (9.8%)	17 (13.8%)	38 (30.9%)
				123 (100%)

Quadro 5.5 – Relação entre posição na vertente (média e alta) e principais litologias na Serra dos Carajás.

Topo/ alta vertente - Quadrilátero Ferrífero				
Litologia	Canga	Contato canga/ FFB	FFB	Total parcial
Cavidades por litologia	18 (17.3%)	11(10.6%)	8 (7.7%)	37 (35.6%)
Média vertente - Quadrilátero Ferrífero				
Litologia	Canga	Contato canga/ FFB	FFB	Total parcial
Cavidades por litologia	20 (19.3%)	17 (16.3%)	12 (11.5%)	49 (47.2%)
				104 (100%)

De maneira geral, independentemente da localização em Carajás ou no Quadrilátero Ferrífero, a maior parte das cavidades está inserida em canga (40,1%), seguido pelo contato entre canga e formação ferrífera bandada (28.63%), formação ferrífera bandada (28.2%), ferricrete (2,2%) e apenas uma cavidade no contato entre canga e rocha máfica e entre formação ferrífera bandada e filito como demonstra o Quadro 5.6 e a Figura 5.1.

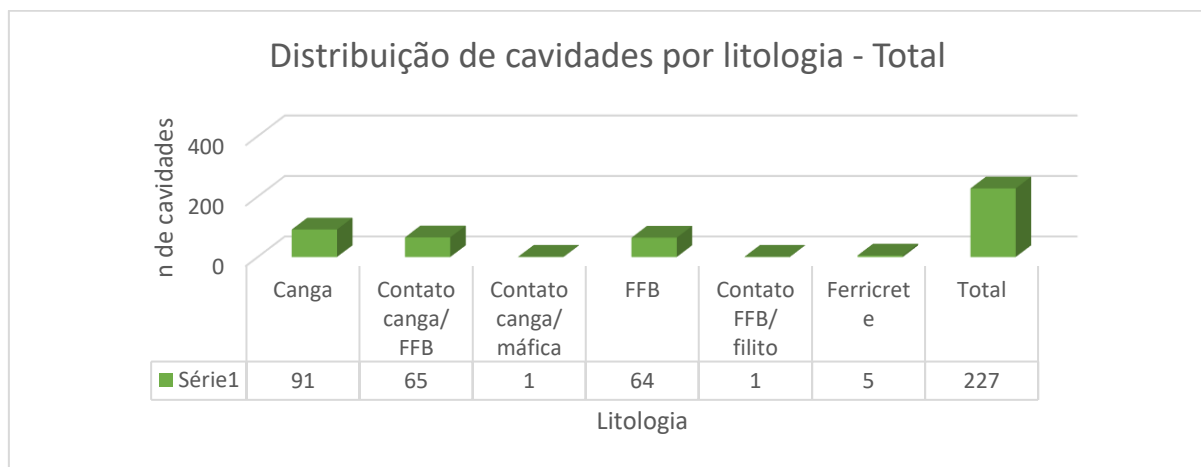


Figura 5.1 – Distribuição por litologias da amostra.

Quadro 5.6 – Relação entre litologia e projeção horizontal.

	Litologia x Projeção horizontal						Total
	Canga	Contato Canga/ FFB	FFB	Ferricrete	Contato canga/máfica	Contato FFB/Filito	
≤ 30 m	67 (73.6%)	30 (46.2%)	53 (82.8%)	3 (60%)	1 (100%)	-	154 (67.8%)
≥31m < 100m	18 (19.8%)	25 (38.5%)	10 (15.6%)	1 (20%)	-	-	54 (23.9%)
≥ 100 m	6 (6.6%)	10 (15.4%)	1 (1.6%)	1 (20%)	-	1 (100%)	19 (8.3%)
Total	91 (40.1%)	65 (28.63%)	64 (28.2%)	5 (2.2%)	1 (0.44%)	1 (0.44%)	227

O resultado da análise do Quadro 5.6 de correlação entre litologia e projeção horizontal confirma a colocação de uma zona preferencial para o desenvolvimento das maiores cavernas no contato entre canga e formação ferrífera bandada. Entre as três litologias quantitativamente mais relevantes, o contato canga/formação ferrífera bandada engloba a menor porcentagem de cavidades menores do que 30 metros e a maior entre as cavernas maiores do que 30 metros de projeção horizontal.

A zona de contato litológico está sujeita à erosão diferencial e conseqüentemente à lixiviação de uma quantidade maior de material inconsolidado a partir de fluxo laminar, além da dissolução intragranular. Segundo Calux, *et al.* (2019), a correlação estabelecida entre morfologia e o contato erosivo da canga com o substrato subjacente é determinada a partir da proporção do litotipo no qual a cavidade se insere. Em relação à evolução de cavidades em canga ou formação ferrífera bandada individualmente, é esperado que, pelo fato de a canga ser constituída por minerais que resistiram à dissolução e lixiviação, esta apresente uma maior resistência à evolução de grandes feições endogenéticas do que a formação ferrífera bandada. Por outro lado, a análise de susceptibilidade à gênese de cavidades nestes litotipos requer um estudo do grau de intemperismo, composição mineralógica e resistência mecânica das rochas, informações geotécnicas e químicas que dificilmente seriam obtidas com segurança na dimensão da amostra trabalhada.

Quanto às maiores cavidades da amostra, apenas 19 possuem mais de 100 metros de projeção horizontal (Quadro 5.7). Entre elas, 12 estão localizadas na Serra dos Carajás e 7 no Quadrilátero Ferrífero. Em sua totalidade, 2 cavidades são paleotocas reconhecida (AP_0038 e S11_0007) e outras 3 são identificadas como galerias, ou seja, escavações antrópicas para exploração mineral (SPA_0021, SPB_0065 e SPD_0003).

Entre as 14 cavidades restantes, 11 se localizam na Serra dos Carajás e apenas 3 se hospedam no Quadrilátero Ferrífero. Estas cavidades se desenvolveram principalmente no contato entre canga e formação ferrífera bandada e apenas uma em canga. Estão posicionadas em média e alta vertente, sendo apenas duas dispostas a menos de 50 metros da drenagem mais próxima.

Quadro 5.7 – Características das cavidades maiores que 100 metros da amostra.

Cavidade	Projeção Horizontal	Província Espeleológica	Litologia	Posição na vertente	Drenagem externa (Distância da caverna até a drenagem mais próxima)	Tipo
S11_0007	1623.0	Carajás	Ferricrete	Baixa vertente	27.2	Paleotoca
N3_0023	365.6	Carajás	Canga	Alta vertente	13.3	Cavidade natural
N4WS_0015	343.2	Carajás	Canga/FFB	Alta vertente	207.5	Cavidade natural
AP_0038	329.4	Quadrilátero Ferrífero	Canga/FFB	Topo	313.7	Paleotoca
SPB_0065	276.5	Quadrilátero Ferrífero	FFB/Filito	Baixa vertente	50.6	Galeria
MS_0021_0022	265.7	Quadrilátero Ferrífero	Canga/FFB	Alta vertente	458.4	Cavidade natural
N4WS_0067	234.5	Carajás	Canga/FFB	Média vertente	74.7	Cavidade natural
S11D_0083	207.3	Carajás	Canga	Média vertente	115	Cavidade natural
AP_0009	184.6	Quadrilátero Ferrífero	Canga	Média vertente	103	Cavidade natural
N1_0020	184.1	Carajás	Canga	Média vertente	135.1	Cavidade natural
N8_0004	159.2	Carajás	FFB	Alta vertente	147.7	Cavidade natural
S11D_0013	152.5	Carajás	Canga/FFB	Baixa vertente	114.9	Cavidade natural
GEM_0684	138.5	Carajás	Canga	Média vertente	35.5	Cavidade natural
N5SM1_0008	137.6	Carajás	Canga/FFB	Baixa vertente	125.8	Cavidade natural
N5SM2_0016	131.2	Carajás	Canga/FFB	Média vertente	516	Cavidade natural
SL_0074	119.8	Carajás	Canga	Média vertente	34.2	Cavidade natural
BRU_0005	114.0	Quadrilátero Ferrífero	Canga/FFB	Média vertente	148.3	Cavidade natural
SPA_0021	110.4	Quadrilátero Ferrífero	Canga/FFB	Alta vertente	272.5	Galeria
SPD_0003	103.5	Quadrilátero Ferrífero	Canga/FFB	Média vertente	204.9	Galeria

5.2 INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

A fim de compreender a distribuição dos dados e subsidiar a análise exploratória dos parâmetros morfométricos, o Quadro 5.8 – apresenta os resultados descritivos referentes às medidas de tendência central (média, mediana e moda), além do desvio padrão como medida de variabilidade.

Quadro 5.8 – Medidas de tendência central e variabilidade referentes aos parâmetros considerados.

	Cobertura areal (Box fill)	Índice de redondeza	Volume específico	Densidade de passagens	A/P ratio	S/L ratio	EW/IW ratio	Índice de complexidade horizontal (Hci)
Mediana	0.5	0.3	3.1	0.2	0.9	1.6	0.8	1.4
Média	0.5	0.3	4.3	0.2	1	2	0.8	1.7
Moda	0.5	0.3	1	0.2	2.9	1.6	1	1.2
D. Padrão	0.1	0.1	4.2	0.1	0.5	2.2	0.4	1.0

5.2.1. Taxa EW/IW

No contexto das cavidades ferríferas, a taxa EW/IW calculada pela relação entre a medida da entrada da cavidade e sua maior largura, resultou no parcial agrupamento de abrigos (cavidades com entrada larga e pouco desenvolvimento horizontal) nos resultados mais elevados e, por outro lado, de cavidades complexas e amplas com entradas proporcionalmente muito pequenas nos resultados mais próximos a zero.

Em relação aos abrigos, a maior largura pode ser equivalente a um valor muito próximo ao da entrada. Desta forma, feições similares foram interpretadas como distintas pelo modelo. Neste contexto, os melhores resultados para o agrupamento das diferentes morfologias de abrigos provavelmente seriam obtidos através da correlação entre a largura da entrada (EW) da cavidade e sua projeção horizontal (PH).

Os resultados mais próximos de zero evidenciaram um grupo de cavidades com arranjo aparentemente mais complexo, ou câmaras isoladas onde ambos apresentam entradas proporcionalmente pequenas em relação ao seu volume, área e projeção horizontal. Acredita-se que estas cavidades correspondem ao modelo de Auler e Piló (2005) no qual os autores propõem que a espeleogênese ocorre inicialmente de forma oclusa, na zona freática, e, posteriormente, com o rebaixamento do nível freático e predomínio dos processos erosivos, uma saída é estabelecida e os sedimentos provenientes do processo espeleogênico são lixiviados.

A Figura 5.2 abaixo corresponde ao histograma de distribuição dos resultados obtidos para EW/IW. A média e a mediana coincidiram em 0,8, o que demonstrou uma

certa simetria na distribuição dos dados. Por outro lado, o desvio padrão igual a 0,4 deve-se à ocorrência de valores muito acima da média, representados pelos abrigos cuja entrada é muito superior à maior largura. A concentração de cociente igual 1 (moda) refere-se aos citados abrigos com os quais a maior largura é representada pela própria entrada e, pode-se dizer que as cavidades aqui consideradas como oclusas, mais representativas e concentram-se nos resultados inferiores a 0,5.

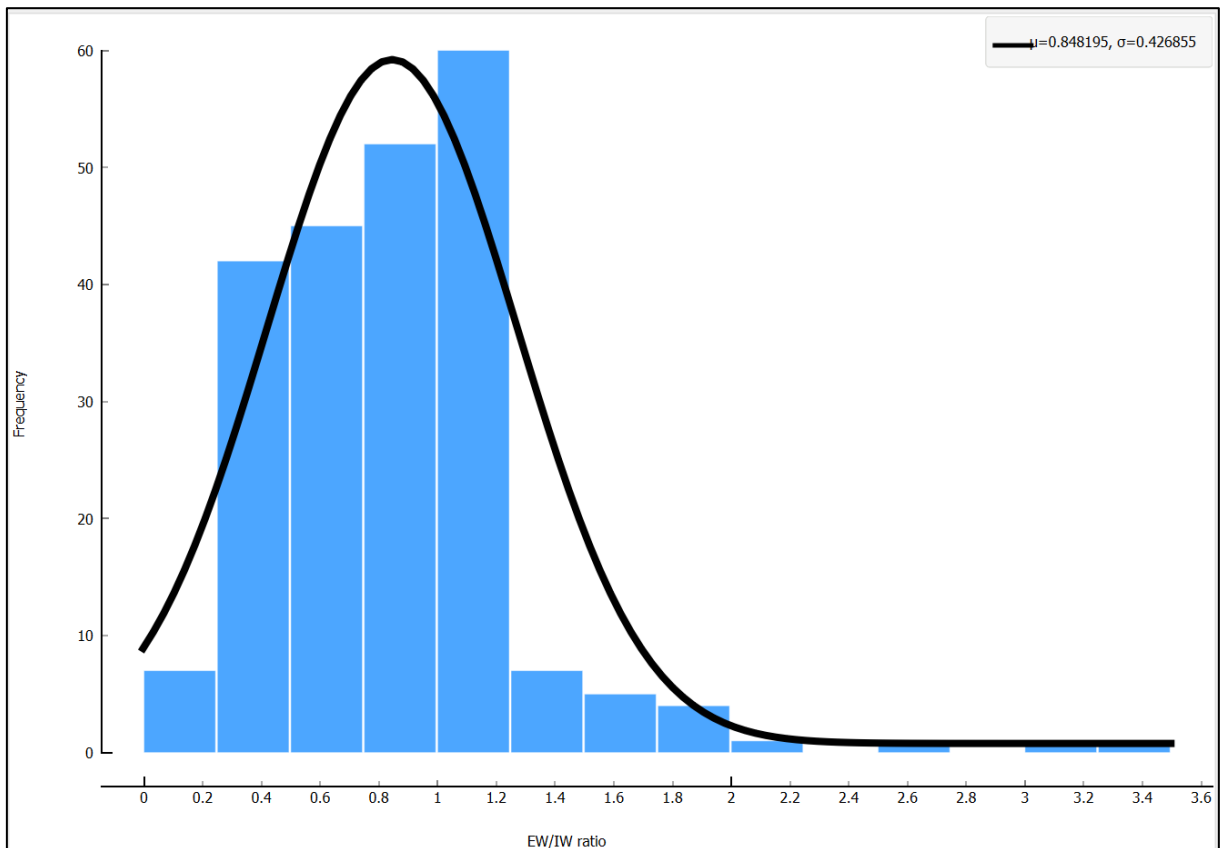


Figura 5.2 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa EW/IW.

O índice de complexidade horizontal utilizado para correlacionar aos resultados da taxa EW/IW, agrupa nos maiores resultados as cavidades que apresentam densidade de condutos, e menores para aquelas representadas por um único salão. Bons exemplos de comportamentos extremados e de seu significado morfológico podem ser encontrados nas cavidades AP_0009 e CX_0007. A cavidade AP_0009 apresentou índice de complexidade igual a 4,92, considerado elevado (Figura 5.3). Por outro lado, obteve um dos menores resultados de EW/IW da amostra (0,29). Contrariamente, a cavidade CX_0007 demonstrou um alto valor de taxa EW/IW, equivalente a 3,04, enquanto o índice de complexidade horizontal obteve o baixo

resultado de 0,83 (Figura 5.3). O mapa espeleotopográfico das referidas cavidades mostra como estas diferenças entre seus índices se refletem em termos morfológicos (Figura 5.4).

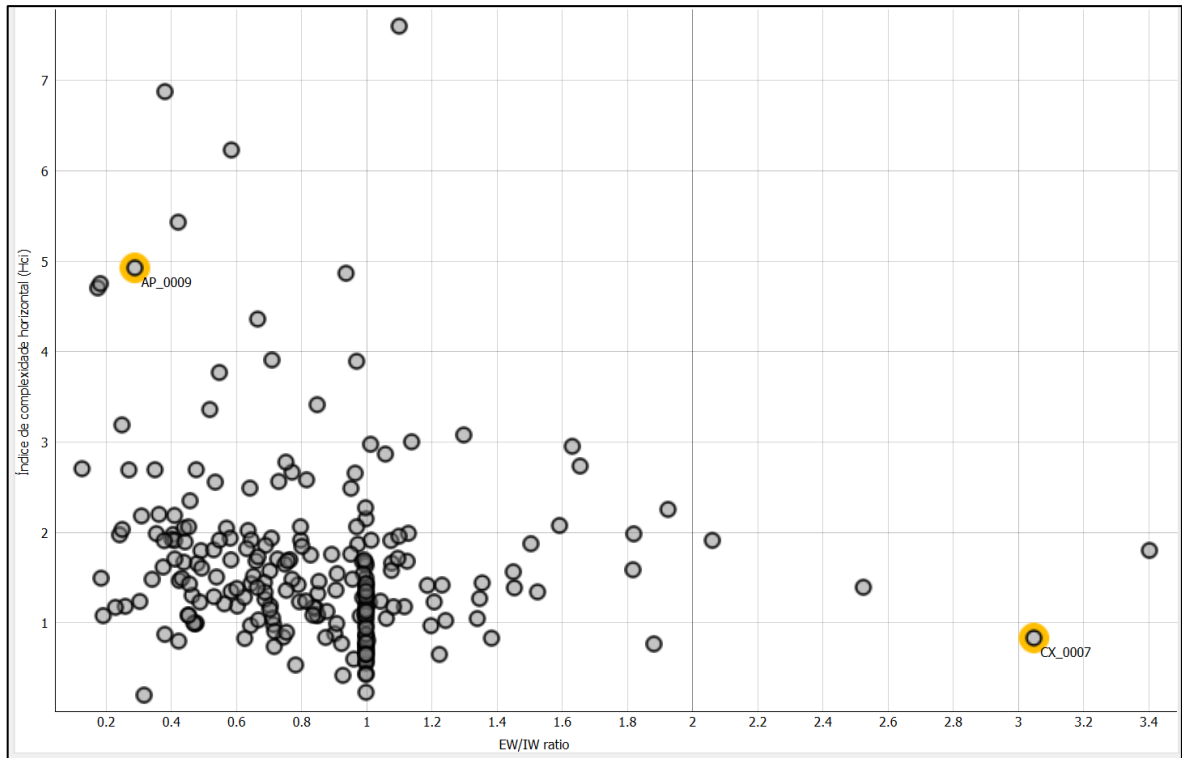


Figura 5.3 – Scatter plot de correlação entre o índice de complexidade horizontal e a taxa EW/IW.

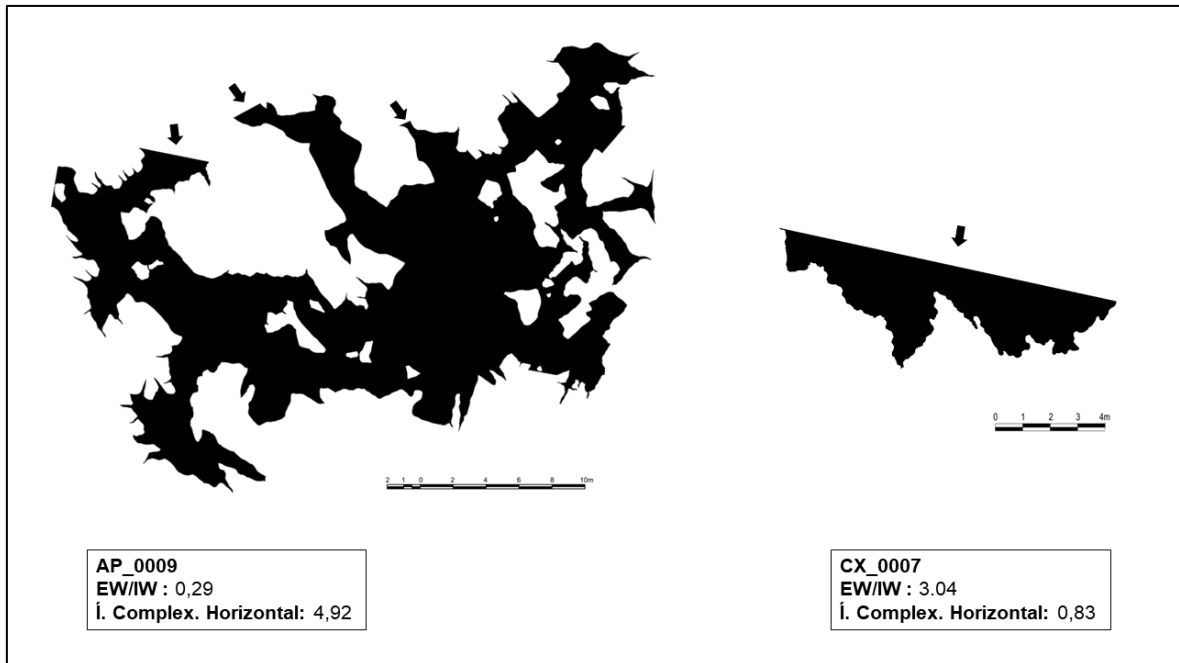


Figura 5.4 – AP_0009, cavidade com baixa taxa EW/IW e alto índice de complexidade horizontal. CX_0007, cavidade com alta taxa EW/IW e baixo índice de complexidade horizontal.

5.2.2. TAXA S/L

A taxa S/L compreende a divisão entre a medida do maior pelo menor eixo da cavidade. Nesta medição realizada no AutoCAD, inseriu-se um retângulo mínimo circunscrevendo a cavidade. Desta forma, é possível afirmar que quanto maior é o resultado, mais linear e estreita é a cavidade, ou que um abrigo possui largura relativamente muito superior à profundidade. A eficiência da aplicação deste parâmetro foi constatada pelo agrupamento de cavidades retilíneas, assim como todas as três galerias lineares adicionadas como controle. Em contrapartida, cavidades amplas, de arranjo mais complexo ou com tendência morfológica circular apresentaram valores de médio a baixos.

O gráfico de distribuição assimétrico positivo representado pela Figura 5.5 demonstra a grande concentração de cavidades que resultaram em taxa S/L abaixo de 2 em comparação àquelas com cociente maior que 3. Os maiores resultados (>3) referem-se às cavidades mais retilíneas e estreitas, enquanto os menores, ao contrário, não detêm estas características.

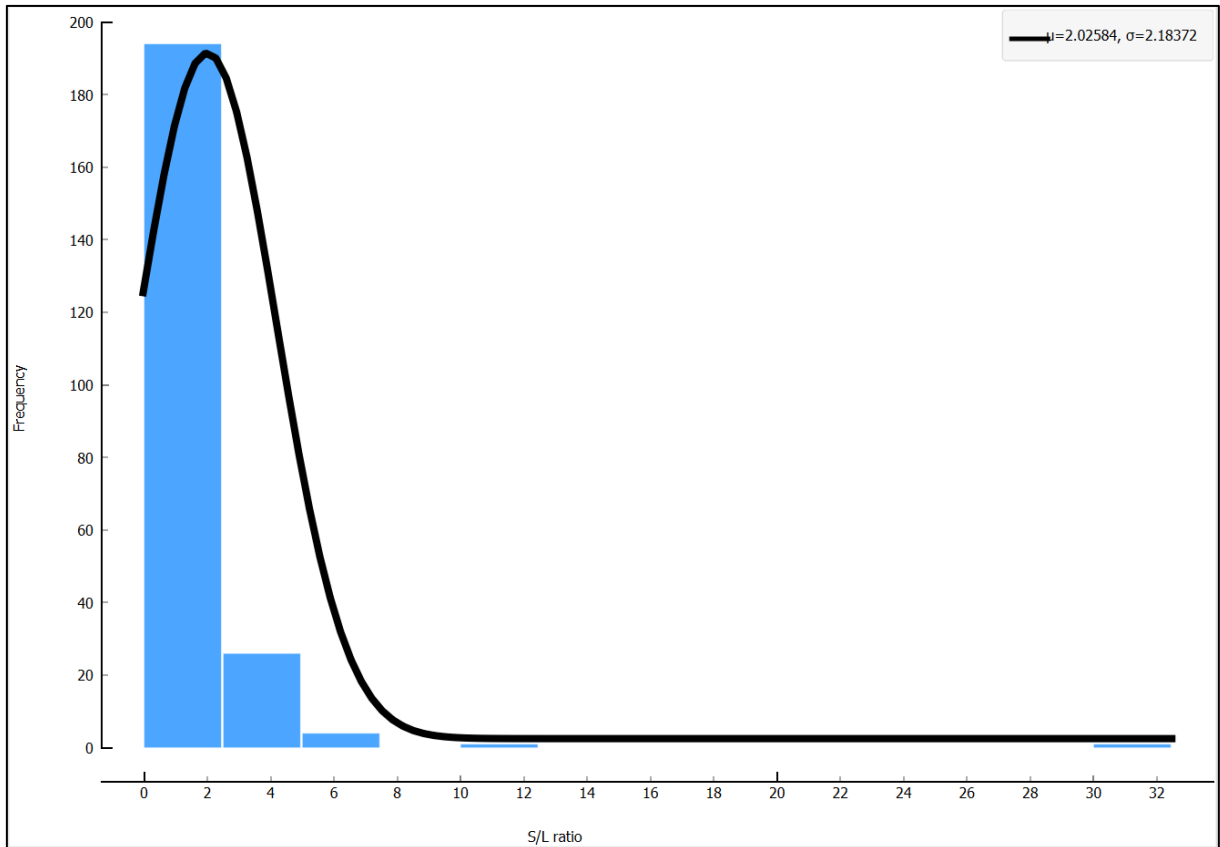


Figura 5.5 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa S/L.

Bons exemplos de comportamentos extremados e de seu significado morfológico são demonstrados nas cavidades SL_0128 e SPA_0021. A cavidade SL_0128 exibe o maior índice de redondeza da amostra (Figura 5.6), ou seja, possui o formato mais próximo ao arredondado (Figura 5.7). Já o resultado de 1,13 para a taxa S/L representa o contrário, um dos mais baixos valores. A galeria SPA_0021, detentora da maior taxa S/L, por outro lado, obteve índice de redondeza igual a 0,02 (Figura 5.6) em decorrência de uma morfologia retilínea estreita (Figura 5.7).

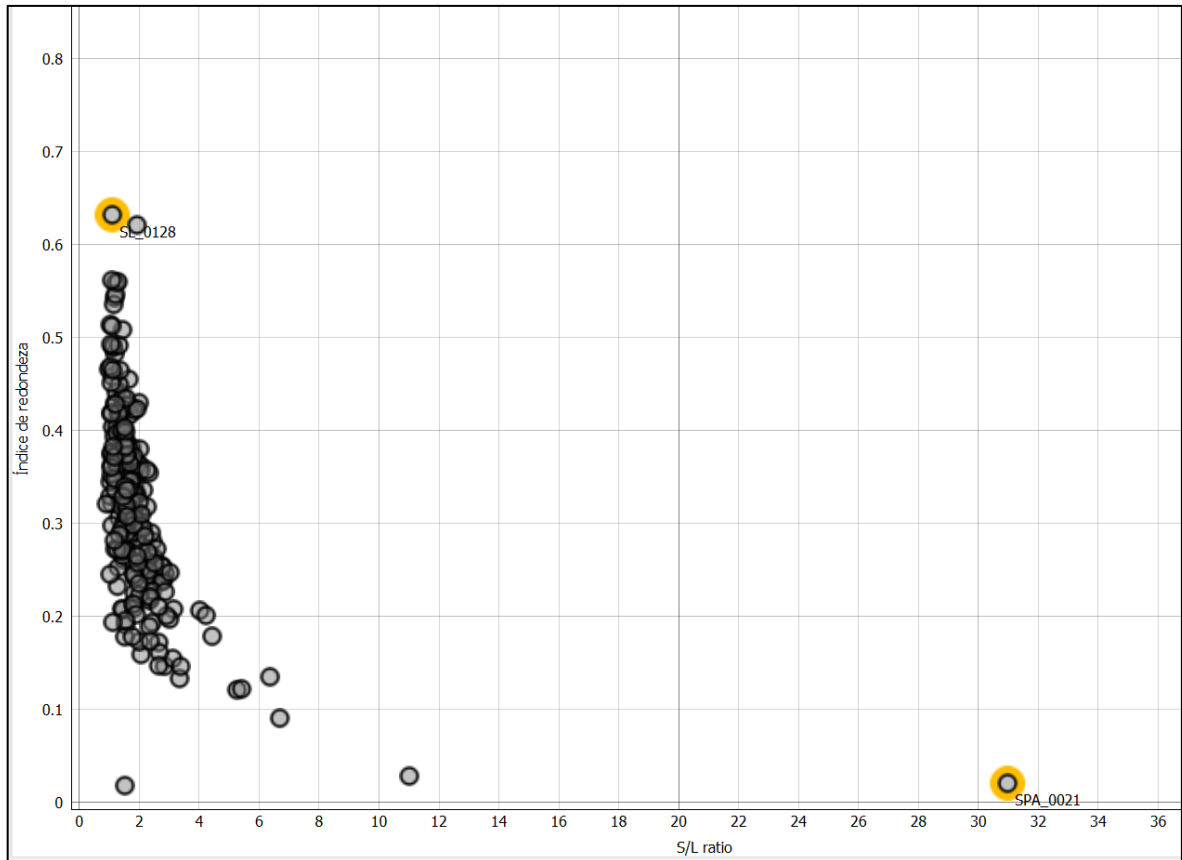


Figura 5.6 – Scatter plot de correlação entre índice de redondeza e taxa S/L.

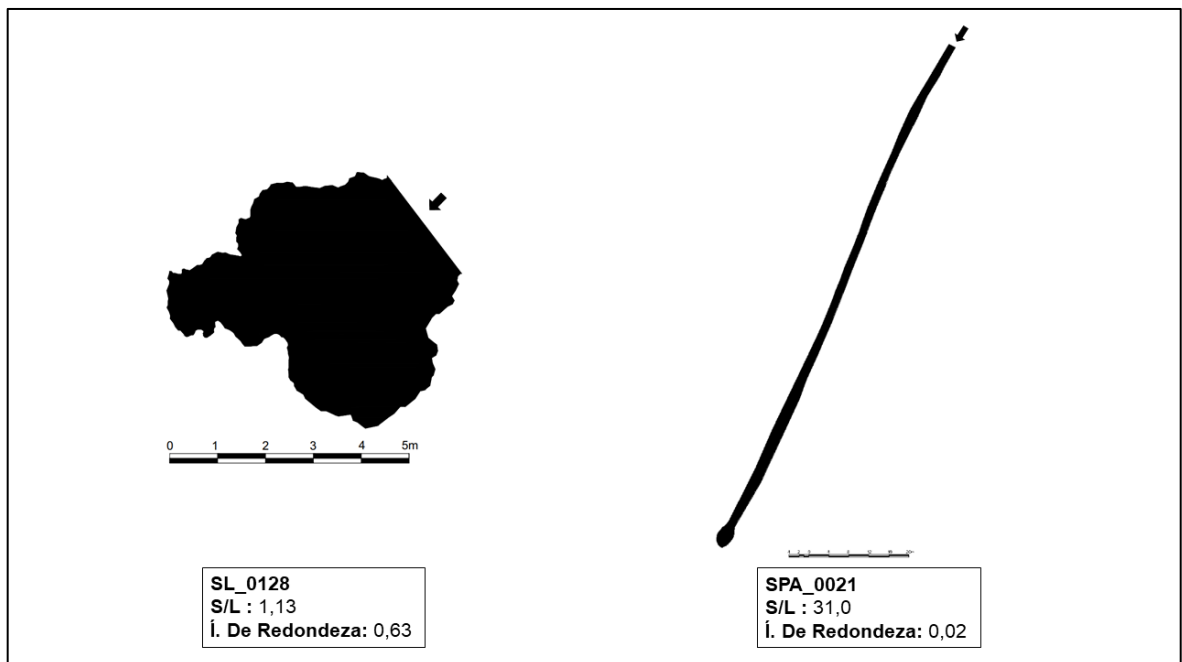


Figura 5.7 – SL_0123, cavidade com baixa taxa S/L e alto índice de redondeza. SPA_0021, cavidade com alta taxa S/L e baixo índice de redondeza.

5.2.3. VOLUME ESPECÍFICO

O volume específico é um bom indicador de morfologia no contexto das cavidades ferríferas. Ao estabelecer a correlação entre o volume da feição e sua respectiva projeção horizontal, é possível observar que as cavidades que apresentam maior índice correspondem àquelas que exibem morfologias típicas de abrigos e pequenas cavidades de um único salão (*chamber*), com baixa projeção horizontal e volume relativamente alto. Em contrapartida, as cavidades relativamente maiores em projeção horizontal, com maior densidade de condutos estreitos e presença de pilares, tendem a refletir em um volume menor ou próximo à projeção horizontal, o que reflete no baixo resultado deste parâmetro.

A distribuição dos dados referentes ao volume específico apresentou a maior variabilidade entre os parâmetros, com resultados entre 0,3 e 46,7 levando a um desvio padrão igual a 4,2. No histograma de distribuição assimétrico positivo representado pela Figura 5.8 abaixo, as cavidades de arranjo complexo e maior projeção horizontal além das pequenas cavidades com baixo volume concentram-se nos baixos valores, enquanto os abrigos e cavidades no formato *chamber*, cujo volume se destaca em relação à projeção horizontal, encontram-se nos altos resultados. O evidente *outlier* com volume específico igual a 47,7 refere-se à cavidade PESL_0001, um abrigo de volume muito grande em comparação à sua pequena projeção horizontal.

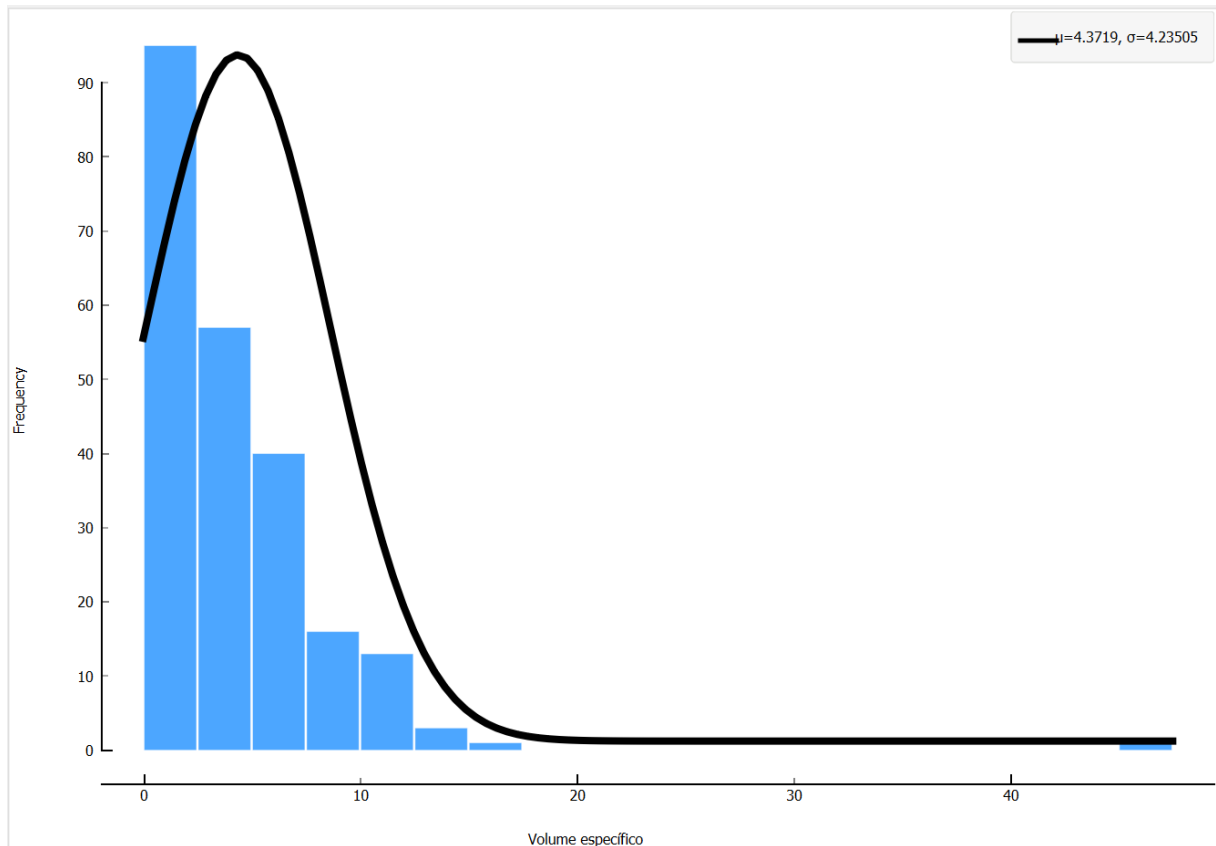


Figura 5.8 – Histograma de distribuição dos resultados do volume específico.

As cavidades N3_0023 e PESL_0001 sinalizadas no gráfico da Figura 5.9 e ilustradas na Figura 5.10 exibem essas divergências morfológicas interpretadas pelos resultados do volume específico. Enquanto a N3_0023, cavidade de maior projeção horizontal dentro da análise, obteve volume específico igual a 6,16, uma das menores cavidades em projeção horizontal atingiu 44,66, o maior valor calculado para este índice. Porém, é importante ressaltar que a utilização de cálculos que empregam o volume proveniente dos mapeamentos pode apresentar considerável margem de erro, visto que este valor é adquirido a partir da aplicação da altura média das medições de seções.

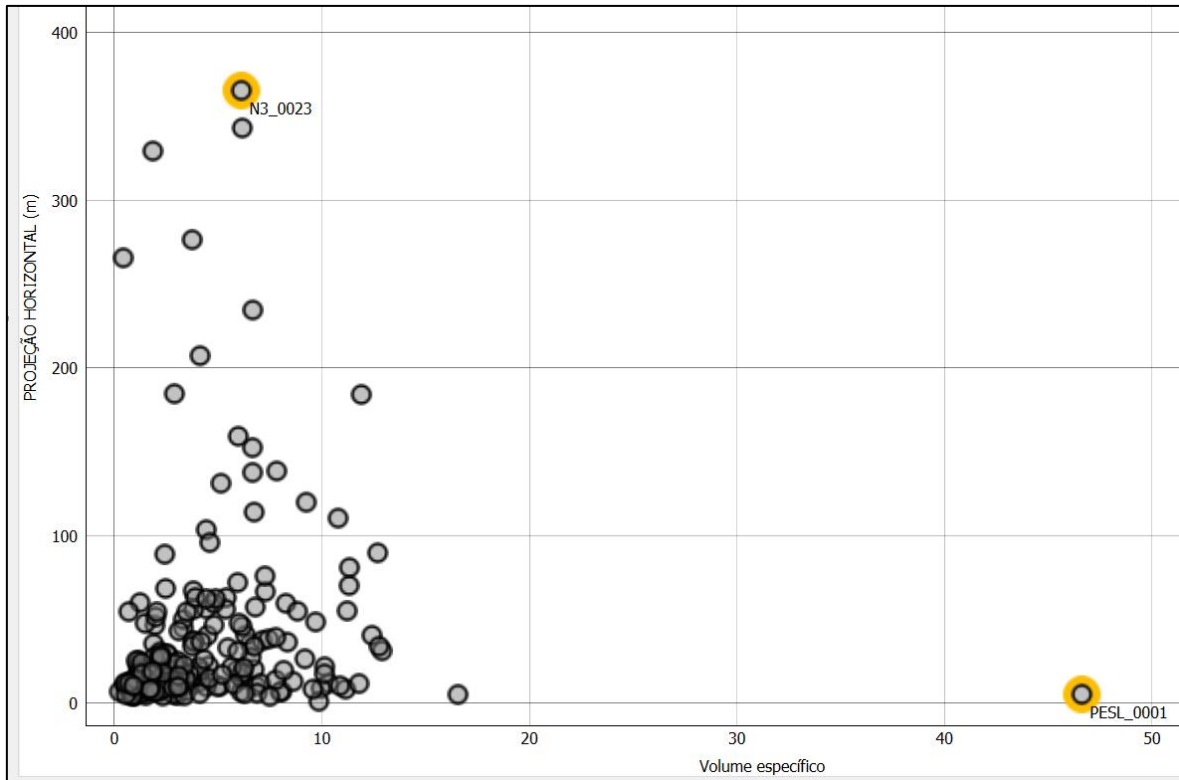


Figura 5.9 – *scatter plot* de correlação entre projeção horizontal e volume específico.

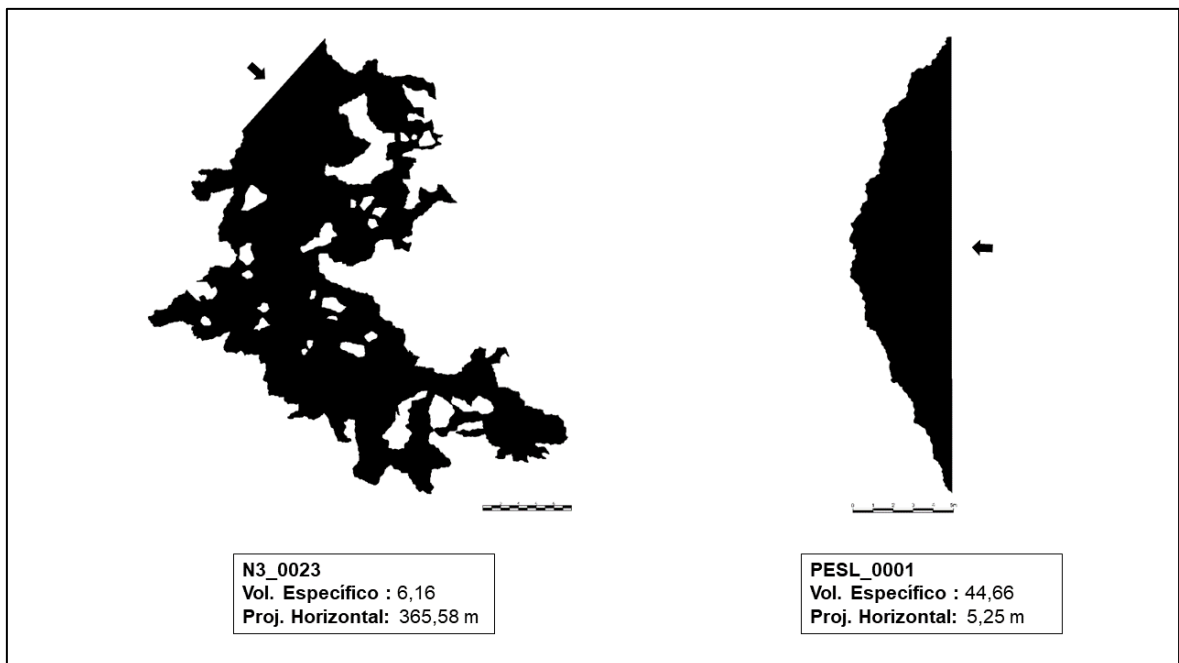


Figura 5.10 – N3_0023, caverna com baixo volume específico e alta projeção horizontal. PESL, abrigo com alto volume específico e baixa projeção horizontal.

5.2.4. COBERTURA AREAL

Como a cobertura areal relaciona a área da cavidade com a área do menor retângulo que a circunscreva, constata-se que os maiores índices foram observados em abrigos, cavidades de único salão (*chamber*) e detentoras de baixa projeção horizontal. Na análise, as feições com cobertura areal alta (maior que 0.6), coincidem com as cavidades que possuem projeção horizontal inferior a 60 metros. Isso ocorre pela predominante ausência de condutos e pilares nas feições citadas, fazendo com que a área delas seja próxima à área do retângulo circunscrito. Por outro lado, ao dividir a área de cavidades mais complexas (aquelas com a presença de condutos, pilares e proporcionalmente amplas em área e projeção horizontal), pela área do retângulo mínimo circunscrito, obtém-se resultados baixos de cobertura areal.

A distribuição do índice, exibido na Figura 5.11, demonstra um gráfico simétrico no qual a média, mediana e moda do parâmetro resultaram em 0,5, pico do gráfico. A cavidade GOGO_0007 apresentou-se como *outlier* em função de seu formato convergente ao do retângulo circunscrito, o que resultou em uma cobertura areal igual a 0,95.

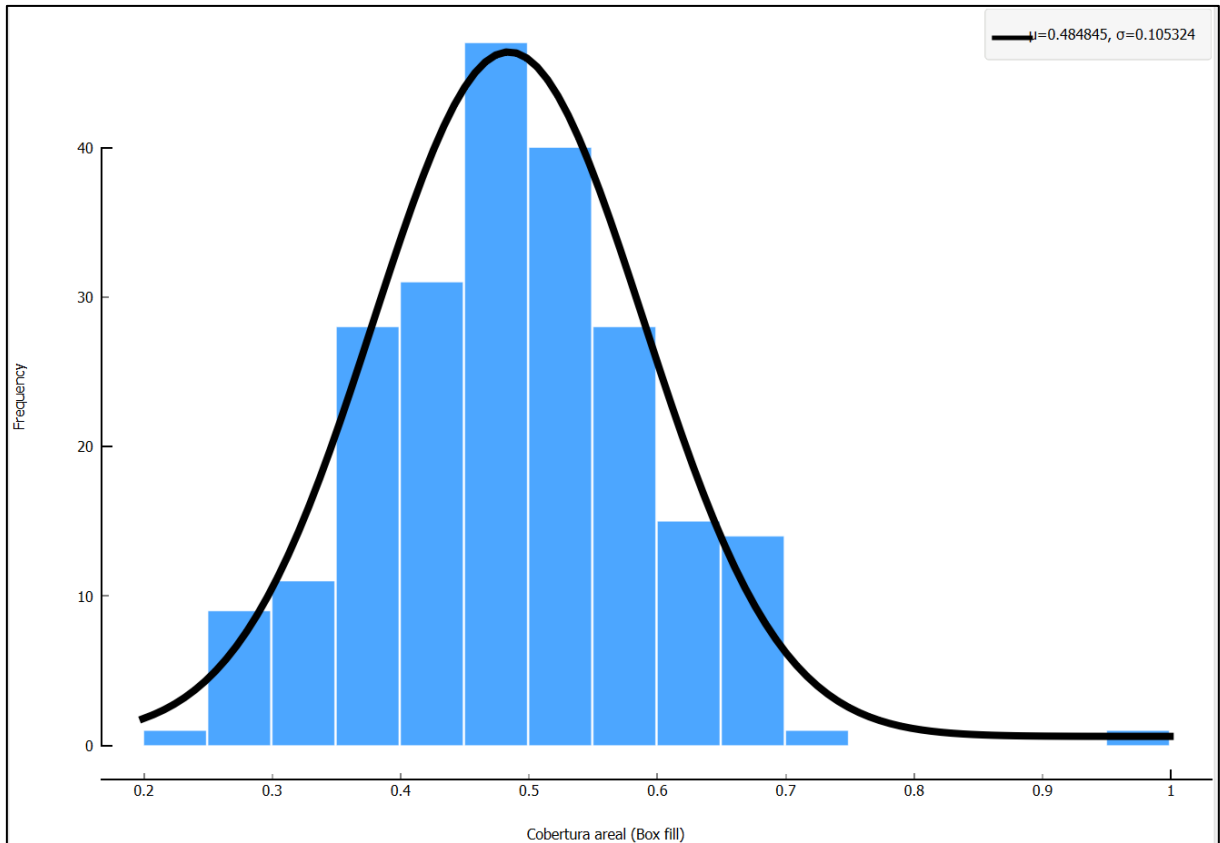


Figura 5.11 - Histograma de distribuição dos resultados da cobertura areal.

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 demonstram a morfologia típica de cavidades que apresentam comportamentos nos extremos opostos para este índice. A cavidade AP_0038 obteve cobertura areal de 0,37 enquanto o abrigo GOGO_0007 apresentou resultado de 0,95. Ou seja, a área efetiva do abrigo condiz quase por completo com a área do retângulo. No caso da AP_0038, por se tratar de uma caverna relativamente labiríntica/ espongiforme e com a presença de pilares (Figura 5.13), sua área efetiva é bastante inferior à área do retângulo circunscrito, resultando assim em um índice baixo.

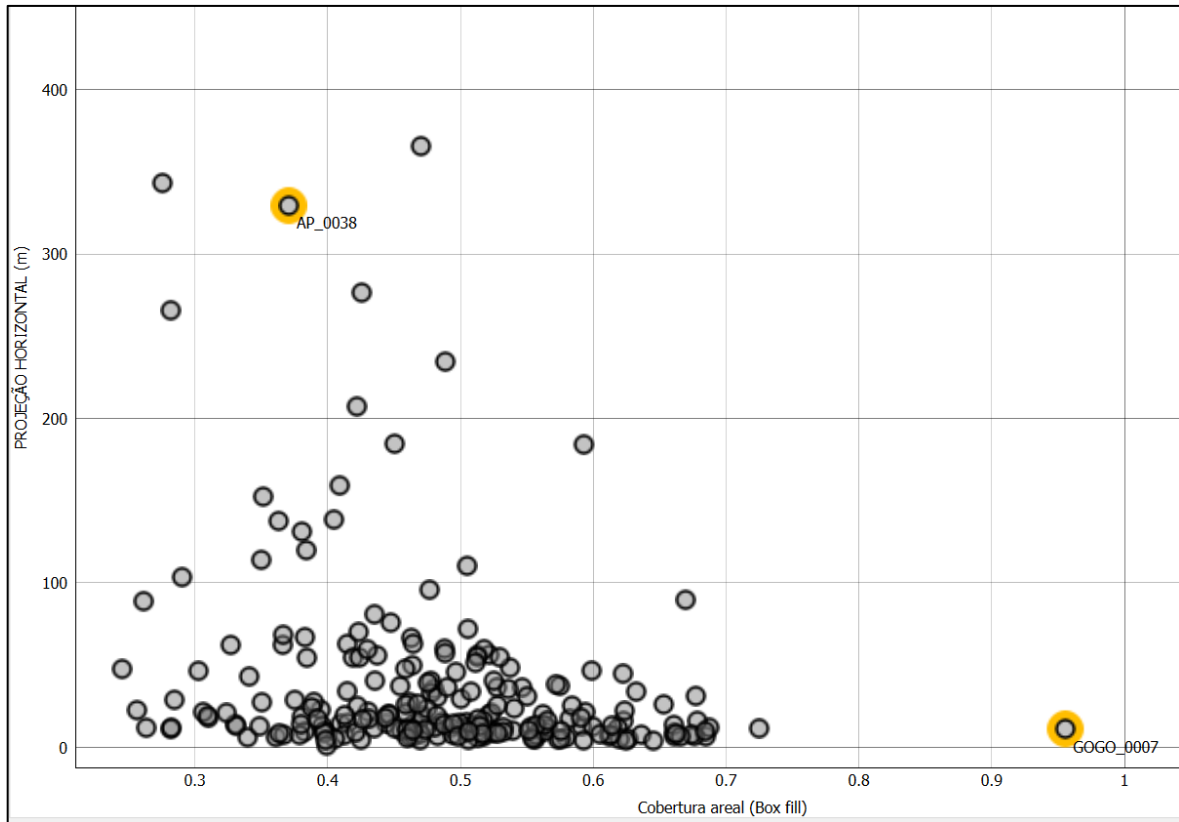


Figura 5.12 – Scatter plot de correlação entre cobertura areal e projeção horizontal.

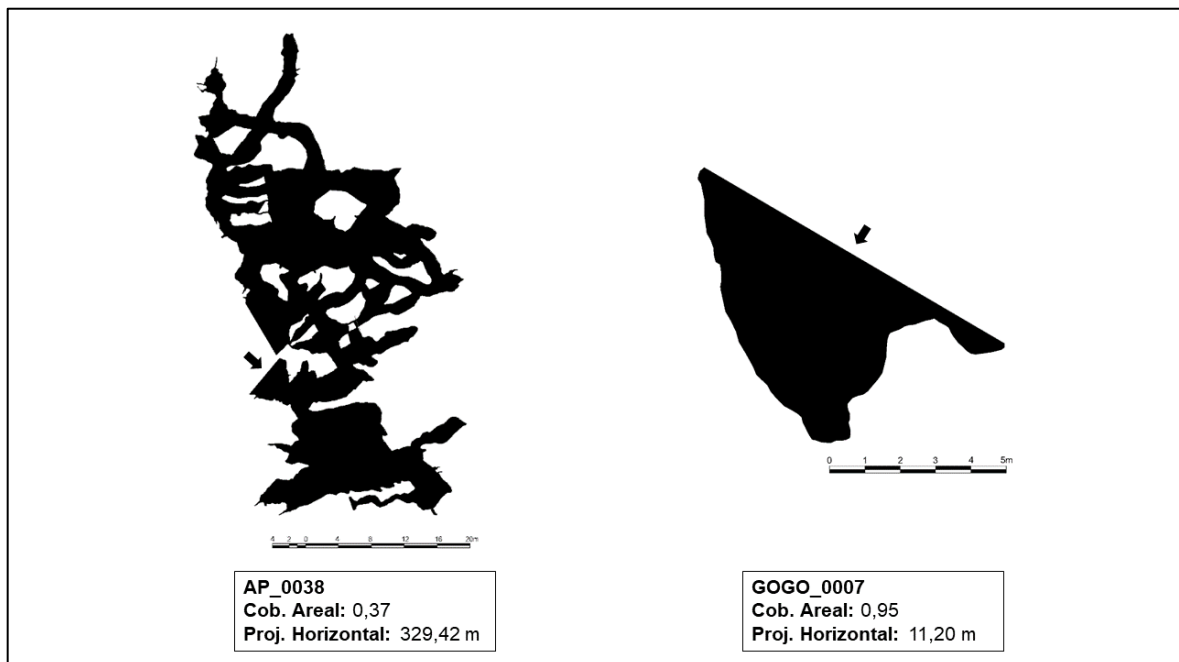


Figura 5.13 – AP_0038, caverna com baixa cobertura areal e alta projeção horizontal. GOGO_0007, abrigo com alta cobertura areal e baixa projeção horizontal.

5.2.5. DENSIDADE DE PASSAGENS

Assim como outros cálculos descritos, a densidade de passagens supostamente deveria separar as *chamber caves* das cavidades labirínticas. Os resultados esperados eram: $DP > 1$ = cavidades labirínticas, $DP < 1$ = a cavidades no formato *chamber*. No entanto, o maior resultado obtido foi igual a 0.73 (Figura 5.15), referente à uma pequena cavidade retilínea de apenas 6,9 metros de projeção horizontal. Assim, de acordo com o que havia sido elaborado pelos autores que elaboraram o índice (Frumkin e Fischhendler, 2005), todas as cavernas da amostra deveriam ser consideradas como *chamber*. Entretanto, isto não condiz com a realidade morfológica de diversas cavidades analisadas. Logo, acredita-se que a dificuldade deste índice refletir a realidade e diversidade morfológica do grupo de cavidades analisadas seja resultado das características morfológicas específicas das cavidades ferríferas.

O gráfico de distribuição dos resultados de densidade de passagens (Figura 5.14) é simétrico, ou seja, com média, mediana e moda equivalentes a 0,2. Os baixos resultados referem-se às pequenas cavidades, os intermediários às grandes e complexas cavernas, e por fim, os mais altos e *outliers* às cavidades retilíneas relativamente estreitas.

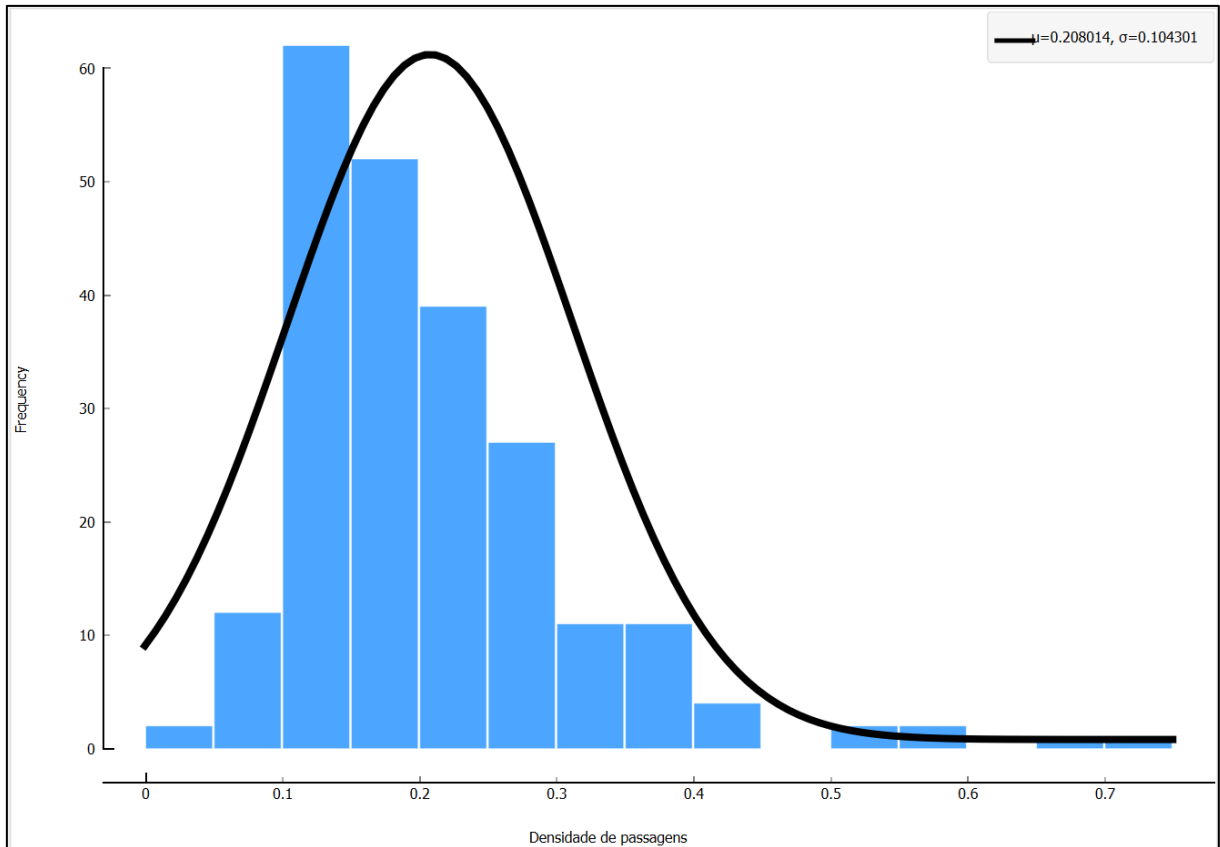


Figura 5.14 – Histograma de distribuição dos resultados da densidade de passagens.

A feição SERP_0147, que obteve o maior índice (Figura 5.15), é formada por um conduto relativamente estreito e curto (Figura 5.16). Por outro lado, dentre as cavidades com projeção horizontal maior que 100 metros a MS_0021_0022 obteve a maior densidade de passagens, igual a 0,39. A este fato supõe-se que a disposição do que consideramos como condutos nas maiores cavernas ferríferas se difere (pela predominância de salões, pouca presença de condutos estreitos e pilares) daqueles das cavernas carbonáticas. Assim, mesmo que em baixo valor, a morfologia da cavidade MS_0021_0022 provavelmente obteve maior resultado pois consiste na feição que mais se assemelha às labirínticas carbonáticas da amostra (Figura 5.16). Apesar de muito fugir ao propósito original de utilização do parâmetro, o índice foi aplicado pois não deixou de dividir dois ou mais tipos distintos de cavidades.

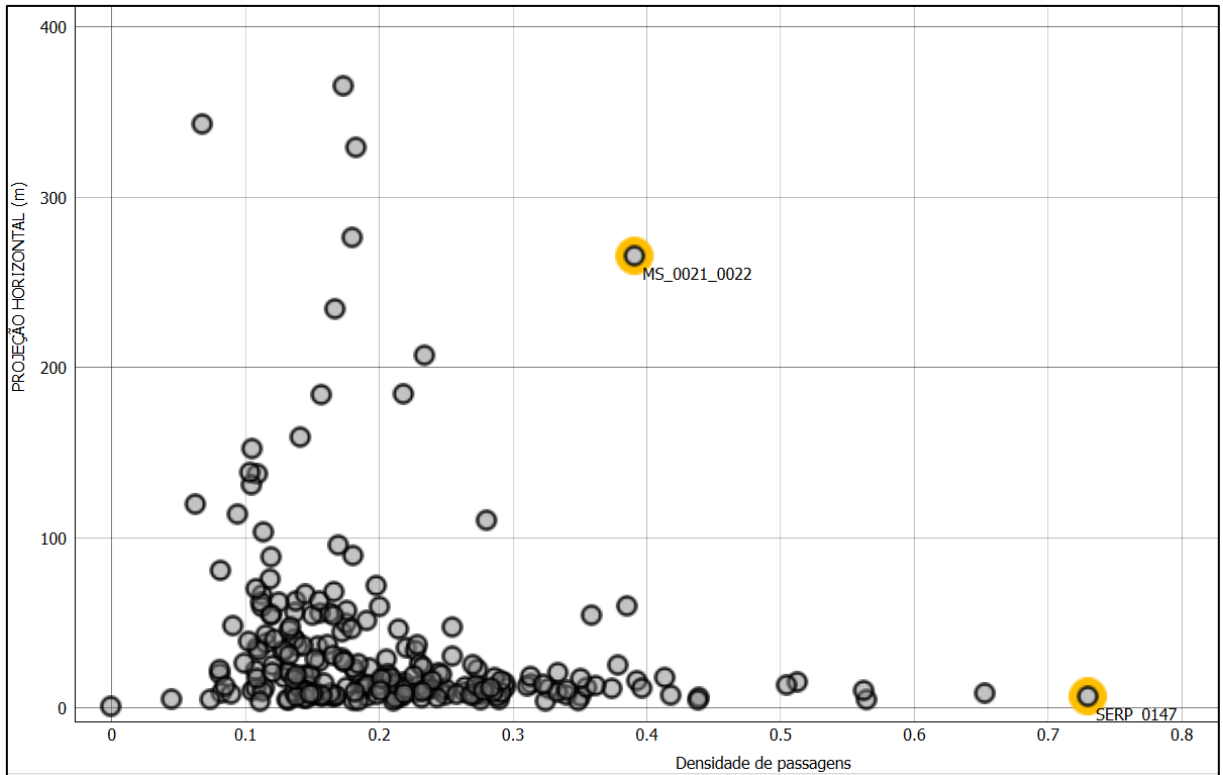


Figura 5.15 – Scatter plot de correlação entre densidade de passageiros e projeção horizontal.

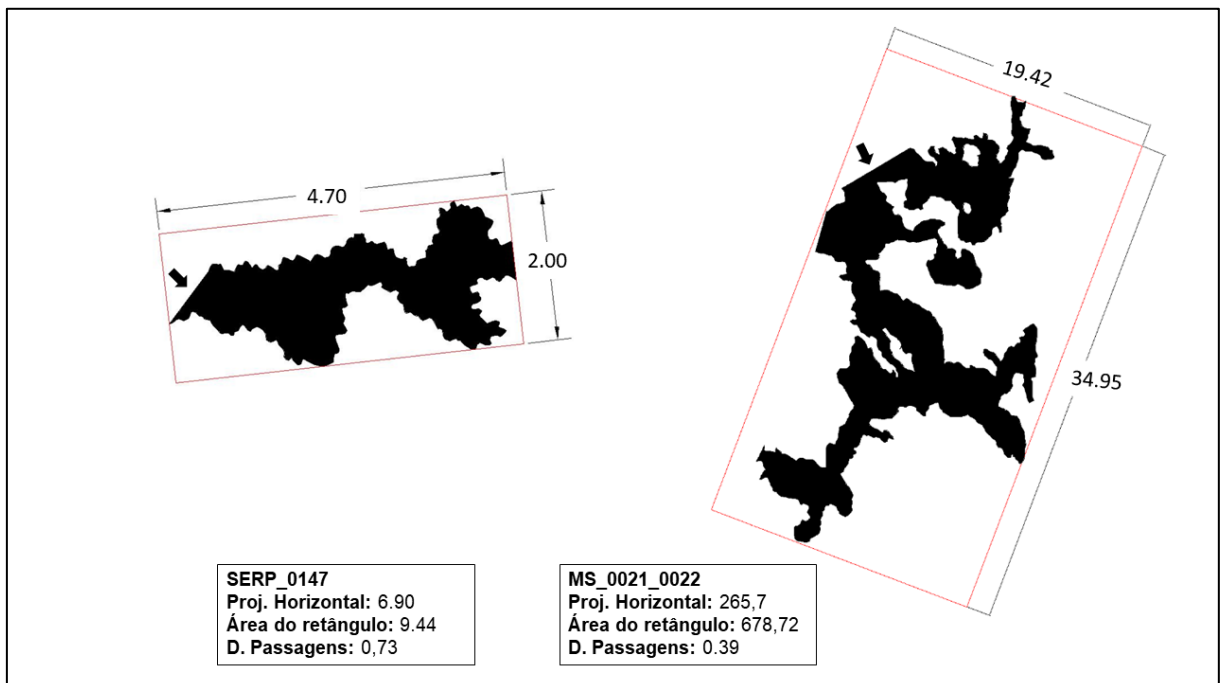


Figura 5.16 – Serp_0147, maior cociente de densidade de passageiros da amostra. MS_0021_0022, apesar de ser uma das maiores cavidades, apresentou densidade de passageiros relativamente média.

5.2.6. ÍNDICE DE COMPLEXIDADE HORIZONTAL

Como a espeleogênese ferrífera é muito distinta à carbonática, as análises sobre as características hidrodinâmicas de fluxo subterrâneo foram desconsideradas da interpretação dos dados. Por outro lado, os resultados indicaram positivamente que, as feições com maior a projeção horizontal e complexidade do arranjo de condutos, possuem os maiores índices de complexidade horizontal. De fato, o histograma (Figura 5.17) demonstra que a distribuição dos resultados do índice de complexidade horizontal é assimétrica positiva, no qual as pequenas cavidades, em maior número, concentram-se nos menores valores enquanto as maiores e mais complexas, nas posições de alto índice assim como *outliers*.

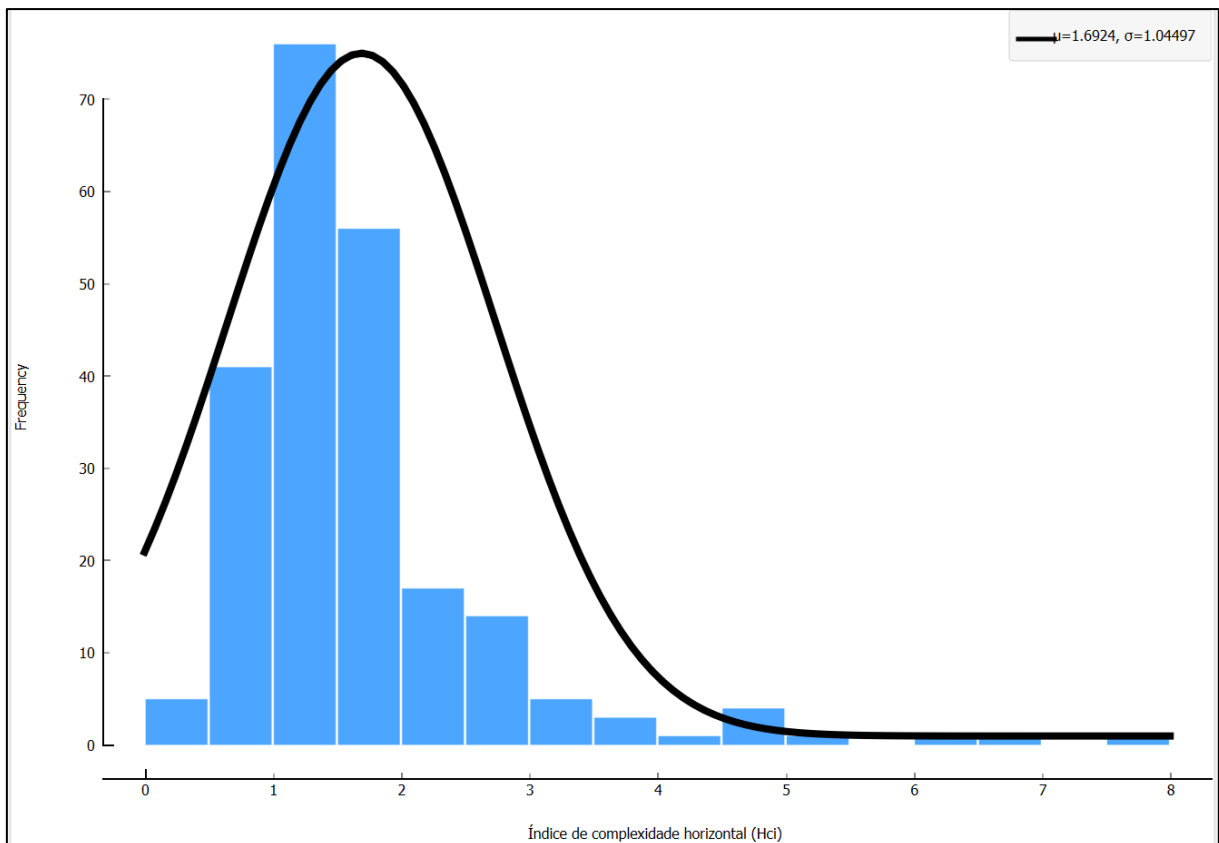


Figura 5.17 – Histograma de distribuição dos resultados do índice de complexidade horizontal.

A Figura 5.18 mostra a distribuição das cavidades de acordo com sua complexidade horizontal. Já na Figura 5.19 é possível observar a diferença morfológica entre uma cavidade com alto índice de complexidade horizontal (MS_0021_0022) e outra de baixo (N3_0077). A primeira apresenta diversas ramificações em seus 267,7 metros de projeção horizontal enquanto a outra um

abrigo, composto por um único salão, com apenas 5,12 metros de projeção horizontal.

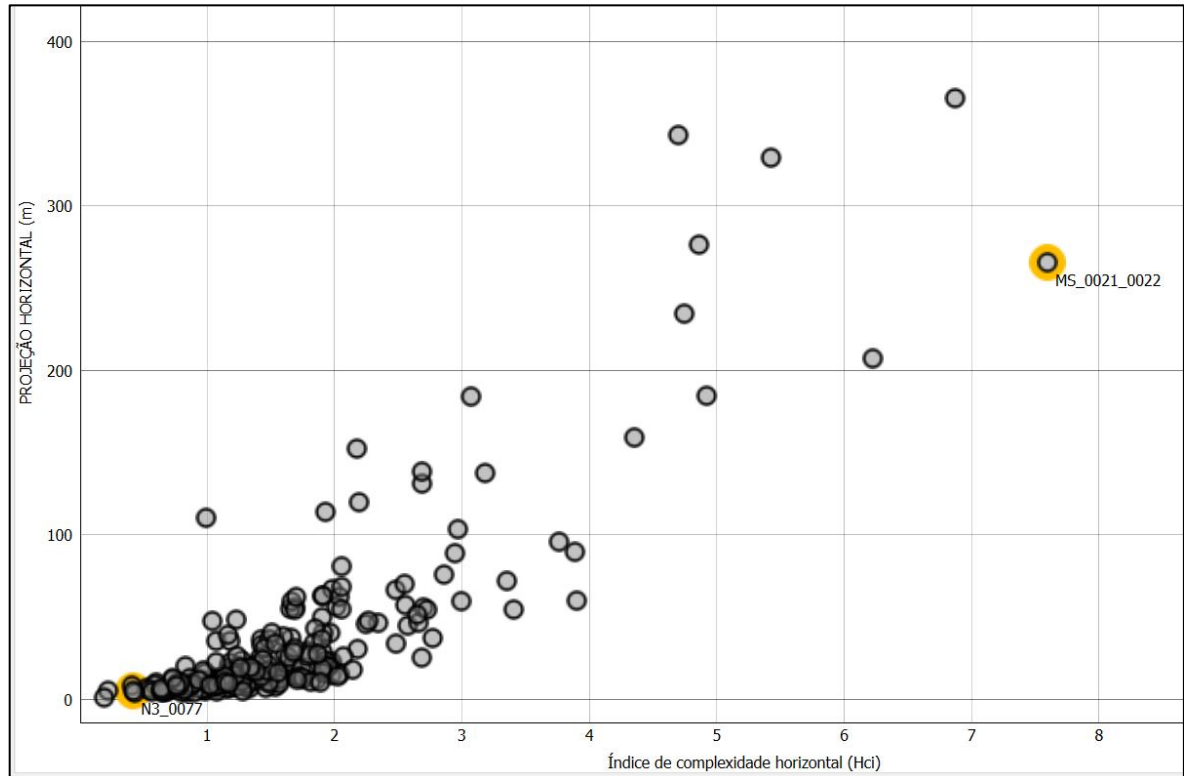


Figura 5.18 – Scatter plot de correlação entre índice de complexidade horizontal e projeção horizontal.

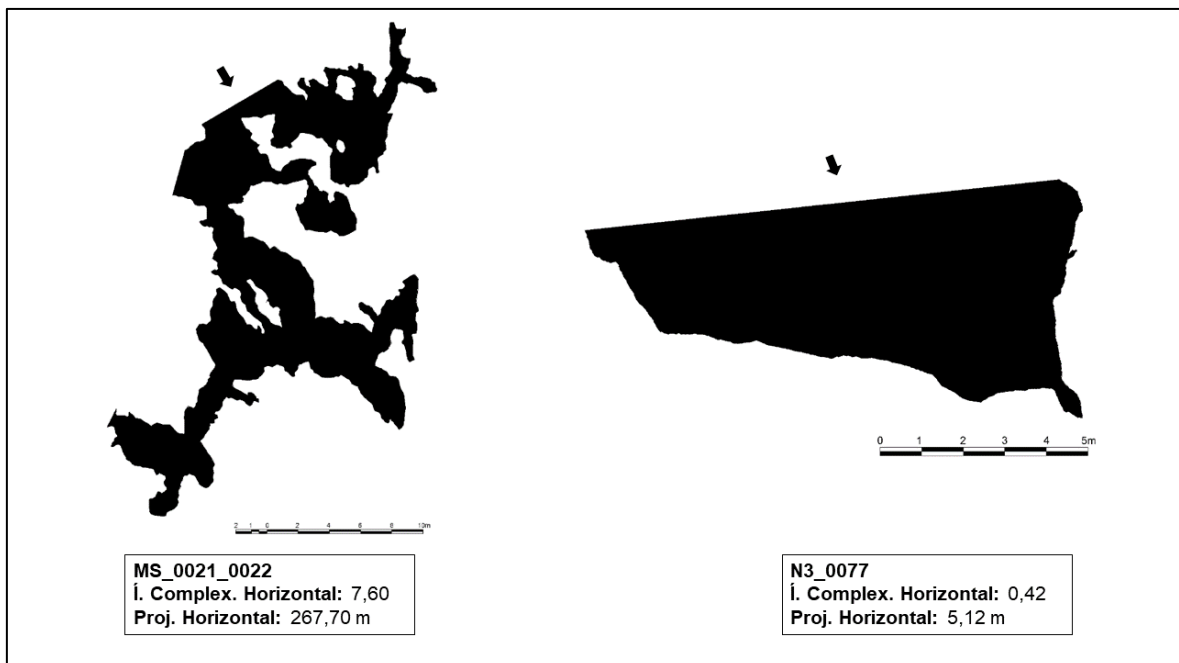


Figura 5.19 – M_0021_0022, caverna com alto índice de complexidade horizontal e alta projeção horizontal. N3_0077, abrigo com baixo índice de complexidade horizontal e baixa projeção horizontal.

5.2.7. TAXA A/P

A taxa A/P foi considerada pelo programa de análise de dados utilizado (*Orange*) como o parâmetro mais representativo para classificação dos objetos. A observação da correlação entre área e perímetro tendem a indicar um valor abaixo de um caso uma cavidade apresente vários condutos e pilares, e acima de zero naquelas cujas composições consistem em um único salão ou poucas irregularidades. A Figura 5.20 exibe a distribuição assimétrica positiva das características citadas.

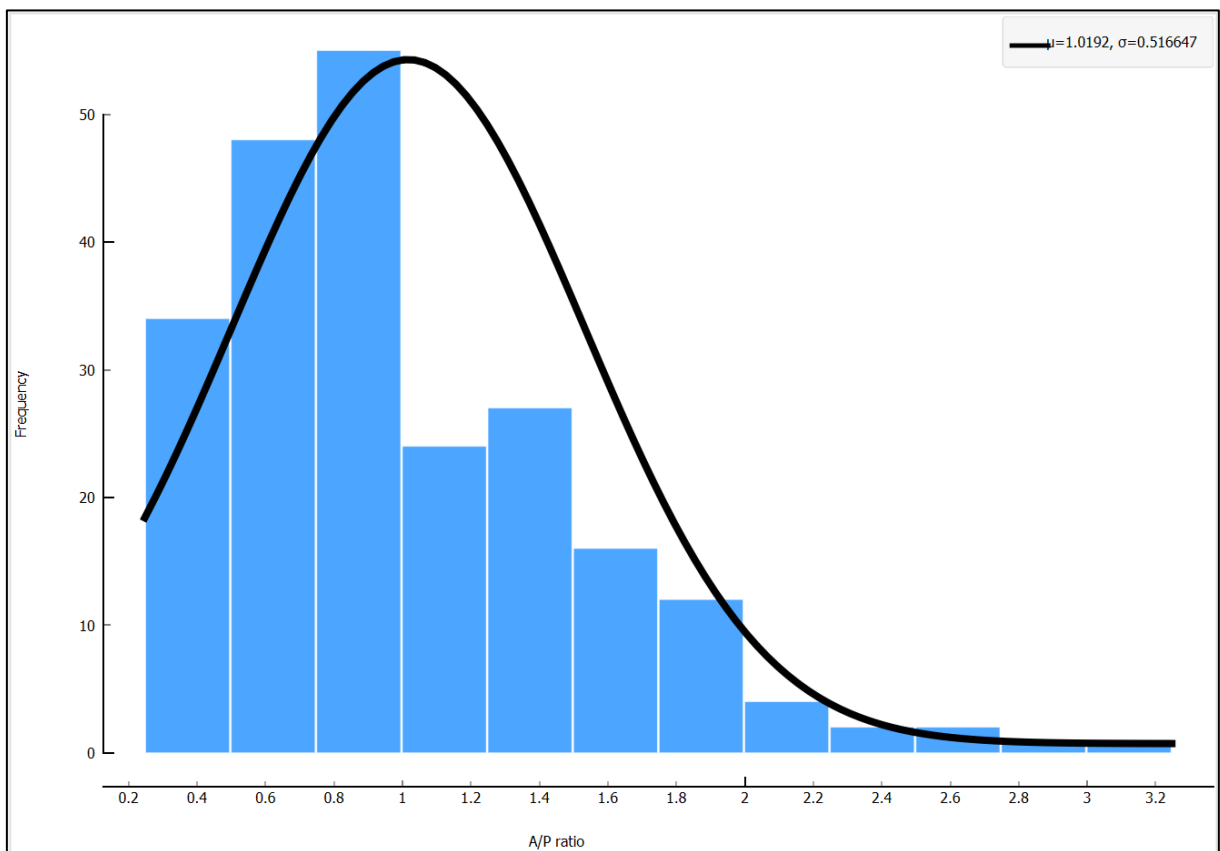


Figura 5.20 – Histograma de distribuição dos resultados da taxa A/P.

Quando comparadas as duas das maiores cavidades em projeção horizontal da amostra esta diferença fica evidente (Figura 5.21). A cavidade MS_0021_0022 se destaca pela composição de condutos relativamente estreitos e irregulares (Figura 5.22). Desta forma, o perímetro desta cavidade é maior do que sua área, resultando em um baixo resultado. Quanto à cavidade N3_0023, mesmo com a presença de alguns pequenos pilares, a amplitude dos salões é o que chama a atenção em sua morfologia (Figura 5.22). Desta forma, esta cavidade apresentou área superior ao

perímetro, gerando assim, o maior resultado da taxa A/P.

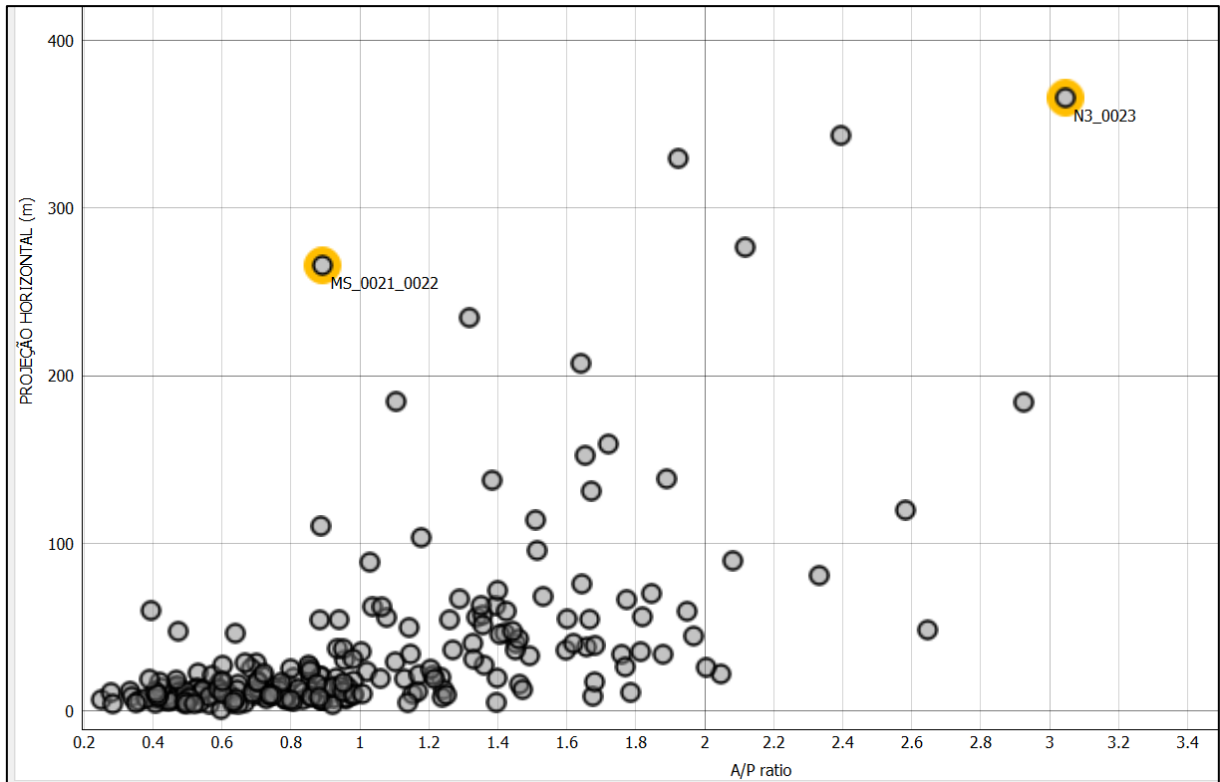


Figura 5.21 – Scatter plot da correlação entre taxa A/P e projeção horizontal.

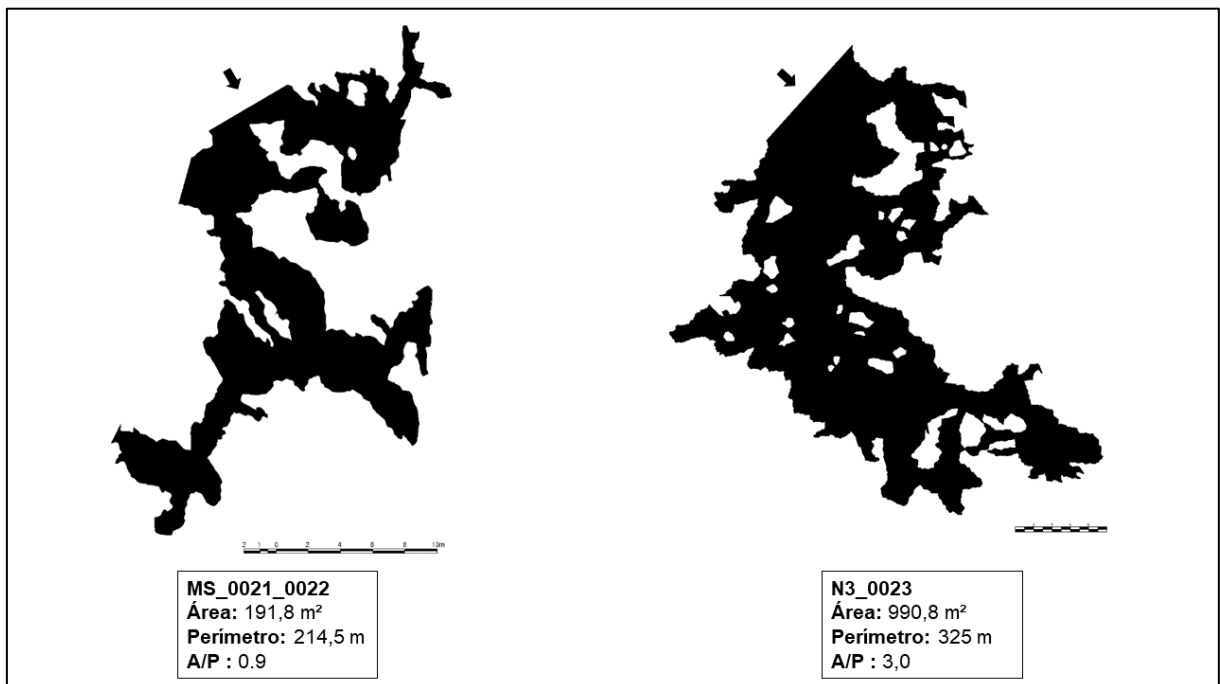


Figura 5.22 – MS_0021_0022, passagens estreitas mais relevantes que salões resultou em baixa taxa A/P. N3_0023, Salões amplos e condutos pouco expressivos levaram a uma alta taxa A/P.

5.2.8. ÍNDICE DE REDONDEZA

O índice de redondeza objetiva agrupar as cavidades que apresentam morfologia circular através da divisão entre a área da cavidade e a área do menor círculo que circunscreva a mesma. Quanto mais próximo de 1, mais a cavidade preenche a área do círculo e detém morfologia circular. A distribuição dos resultados deste índice, como representado na Figura 5.23, foi simétrica com média, mediana e moda equivalentes a 0,3. Abaixo deste valor encontram-se as cavidades sem a característica morfológica circular, enquanto acima, quanto maior o resultado, como dito, mais a cavidade possui traços arredondados.

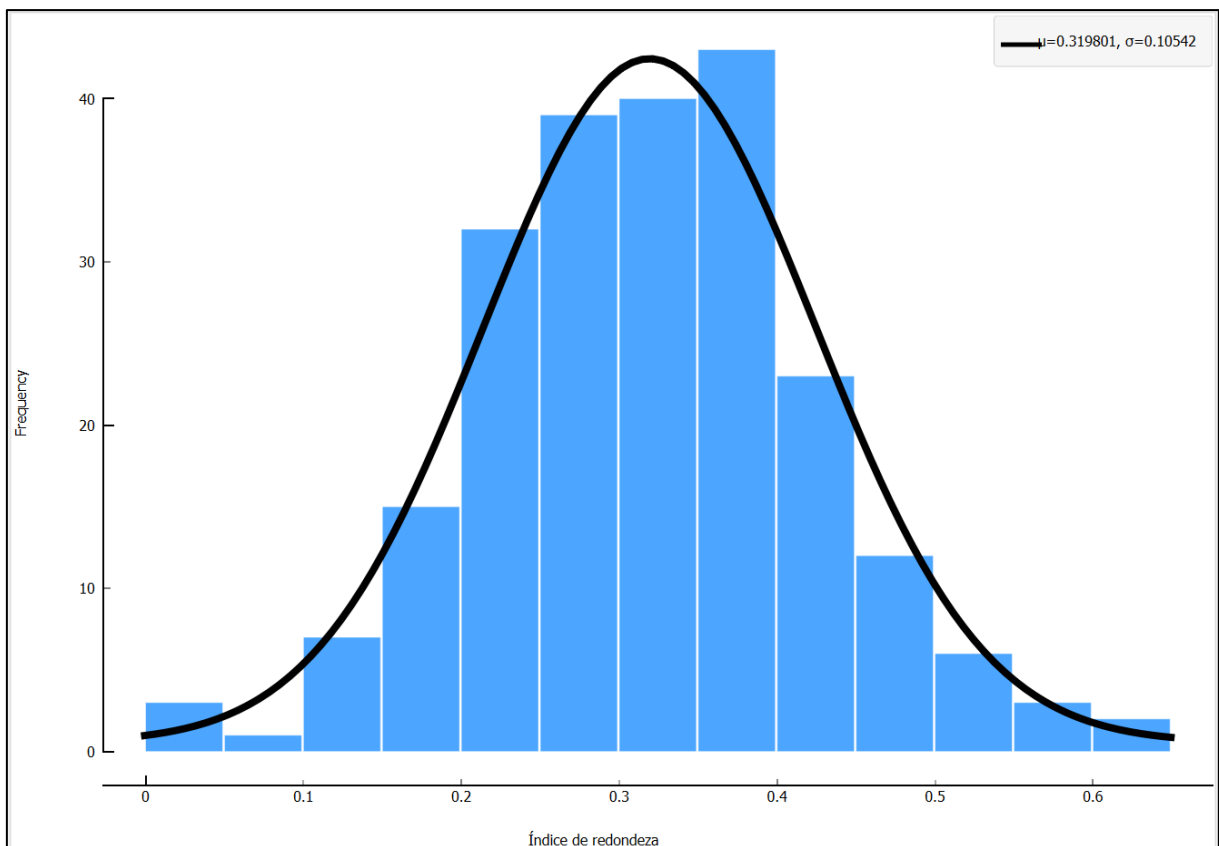


Figura 5.23 – Histograma de distribuição dos resultados do índice de redondeza.

Utilizando o mesmo exemplo apresentado para a taxa S/L, a Figura 5.24 e a Figura 5.25 relacionam os dois parâmetros por gerarem resultados inversamente proporcionais para morfologias tão distintas. A cavidade S11C_0013 possui morfologia retilínea, dessa forma obteve baixo resultado no índice de redondeza (0,09)

e alto na taxa S/L. Ao contrário, a cavidade BR_0064, de morfologia próxima à circular, apresentou índice de redondeza equivalente a 0,56, valor consideravelmente alto para a amostra, e resultado baixo referente à taxa S/L.

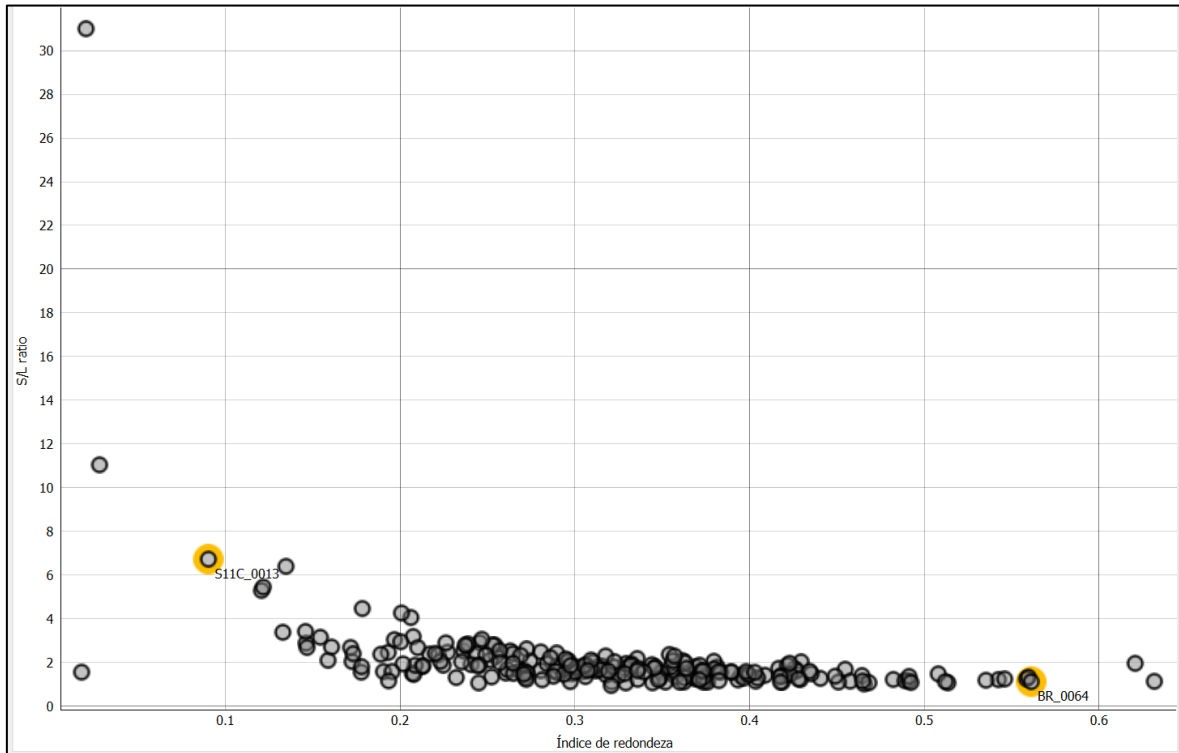


Figura 5.24 – Scatter plot de correlação entre o índice de redondeza e a taxa S/L.

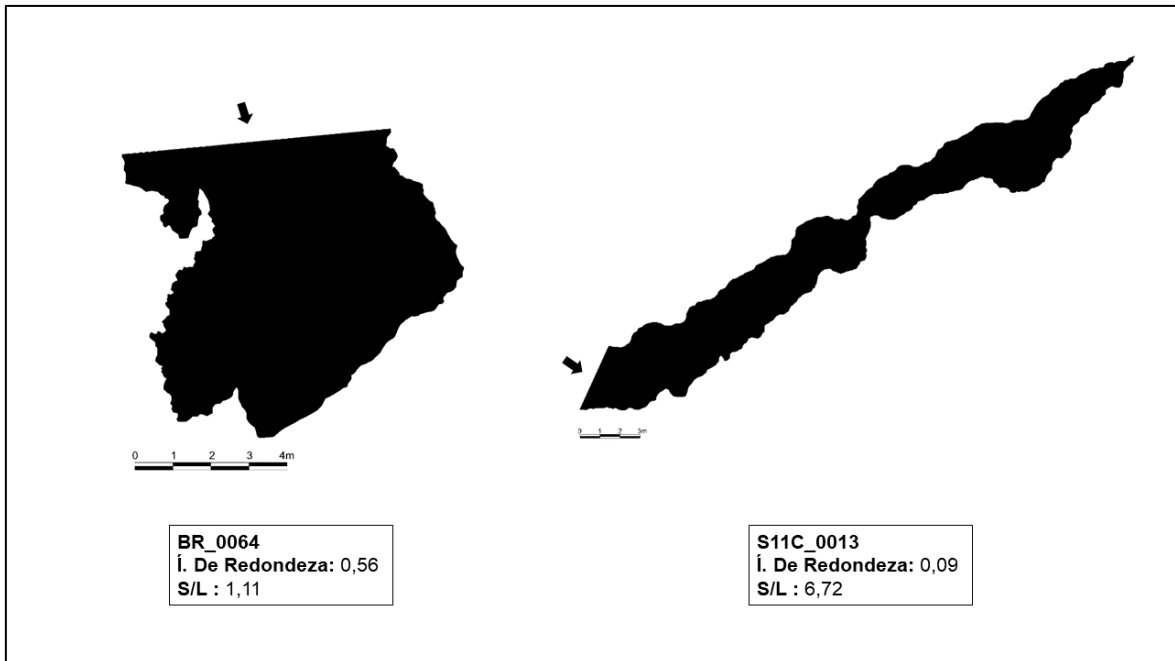


Figura 5.25 – BR_0064, cavidade com alto índice de redondeza e baixa taxa S/L. S11C_0013, caverna com baixo índice de redondeza e alta taxa S/L.

5.2.9. ANÁLISE MULTIVARIADA DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

No tocante à análise multivariada dos parâmetros realizada através de fluxo de trabalho no *software Orange*, o resultado da aplicação da ferramenta *rank* e detalhado na Figura 5.26, sugere que, dentre todos os parâmetros considerados, a taxa A/P, o volume específico e a densidade de passagens, respectivamente, possuem a maior capacidade de descrever o conjunto de cavidades. Desta forma, considera-se que o *software* priorizou o resultado destes parâmetros para agrupar os objetos, não significando, porém, que os demais foram excluídos desta análise.

Input			
Features: Volume específico, EW/IW ratio, Densidade de passageiros, A/P ratio, Índice de redondeza, Cobertura areal (Box fill), S/L ratio, Índice de complexidade horizontal (Hci)			
Meta attributes: CAVERNA			
Target: Cluster			
Ranks			
	#	Gain ratio	Gini
A/P ratio		0.2471637412409422	0.2726197885660977
Volume específico		0.210312324028978	0.23612090862287685
Densidade de passageiros		0.13941364732001335	0.15484470927494942
Índice de complexidade horizontal (Hci)		0.048869079213088217	0.06457201426308351
Índice de redondeza		0.012438336347355076	0.01612401373077932
Cobertura areal (Box fill)		0.009123208595861299	0.011679828045326746
EW/IW ratio		0.008851728158452223	0.01077620614121888
S/L ratio		0.003175084881280934	0.004122217204064249
Output			
Features: A/P ratio, Volume específico, Densidade de passageiros, Índice de complexidade horizontal (Hci), Índice de redondeza, Cobertura areal (Box fill), EW/IW ratio, S/L ratio			
Meta attributes: CAVERNA			
Target: Cluster			

Figura 5.26 – Ordenação dos parâmetros por *score*.

A partir dos resultados estabelecidos pelo *rank*, obteve-se a clusterização exposta na Figura 5.27. A quantidade de clusters definida pelo *Silhouette Plot*, resultou que, para o conjunto de dados do presente estudo, a utilização de dois *clusters* é apropriada para agrupamento geral das cavidades. A Figura 5.28 exibe uma simulação da análise de qualidade dos agrupamentos compostos por quatro e dois *clusters*. O gráfico (A), referente à escolha de quatro *clusters* indica que além da definição de um grupo composto por apenas uma cavidade (C2), o *cluster* C4 não apresenta confiabilidade pois grande parte e seus objetos se encontram com valor próximo a 0 ou distante de 1. Por outro lado, o gráfico (B), no qual consideram-se apenas dois *clusters*, mesmo com a perceptível adequação do *cluster* C2 em eficiência do agrupamento dos dados, é possível observar que o *cluster* C1 permaneceu exibindo um nível de confiabilidade limitado, em função da quantidade de objetos que ainda se encontram com valores distantes de 1, na fronteira com o *cluster* C2. Pelo *test and score* dos dois *clusters*, o modelo apresentou acurácia média (CA) de 90,3% em C1 e C2, o que significa que a cada 10 previsões do modelo, 9 estavam corretas, atestando assim, a confiabilidade dos agrupamentos.

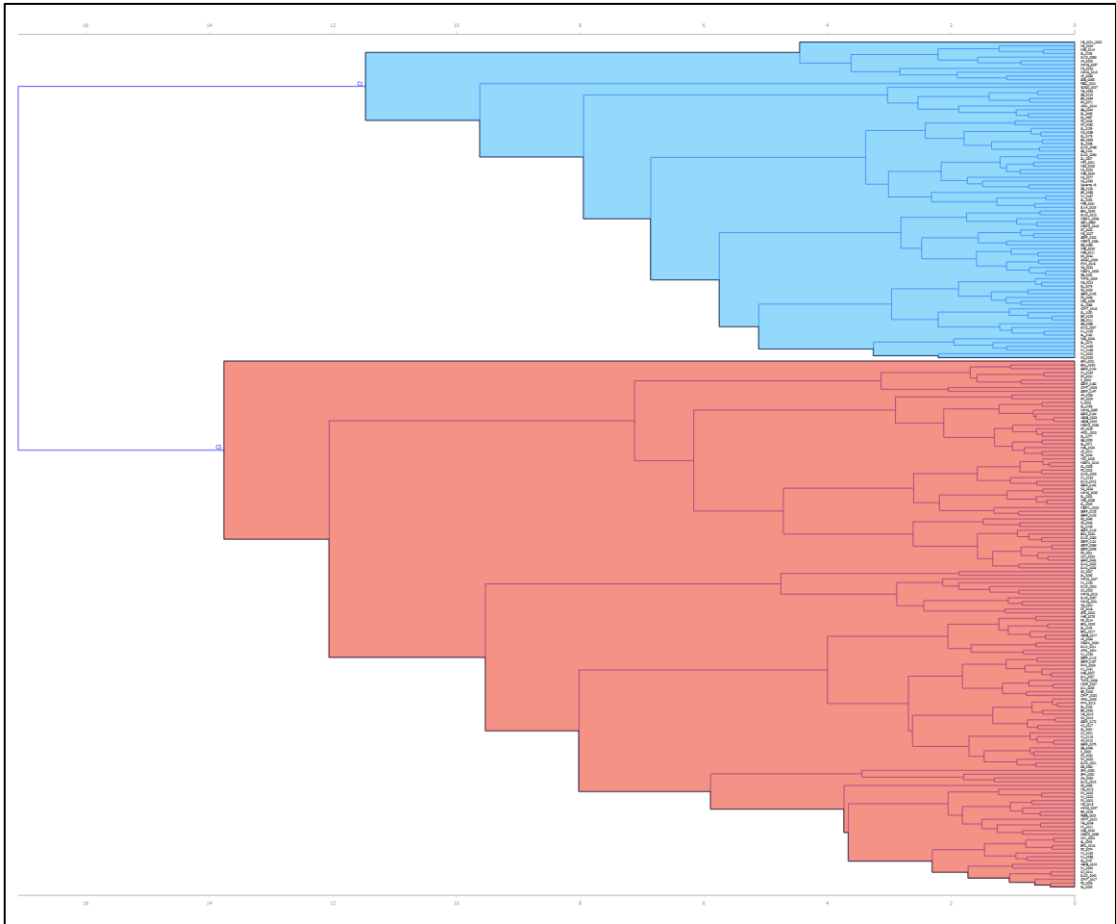


Figura 5.27 – Dendrograma resultante do agrupamento hierárquico realizado.

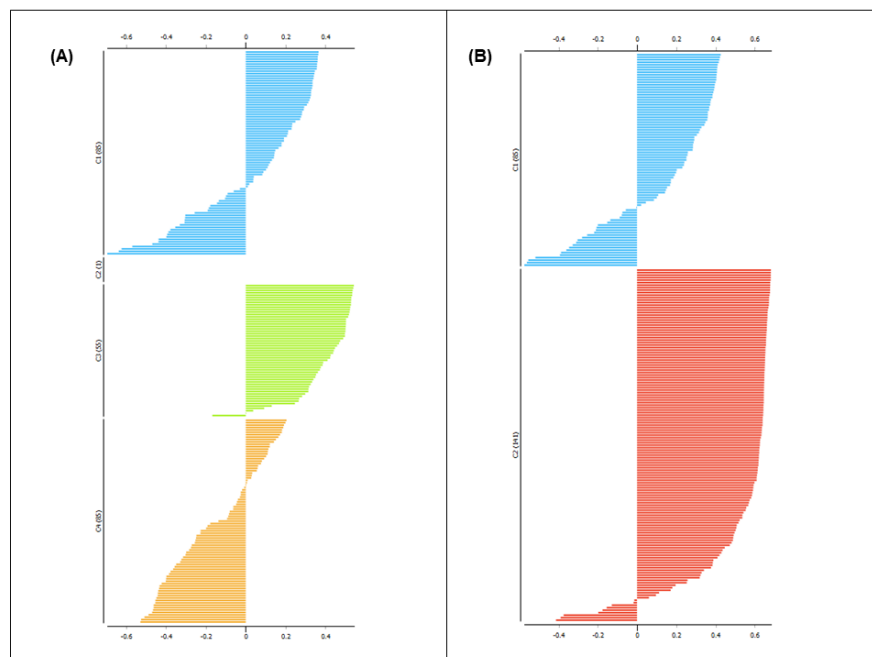


Figura 5.28 – (A) Simulação no *silhouette plot* da utilização de quatro *clusters* resulta na configuração do *cluster* C4 sem confiabilidade. (B) O teste realizado com dois *clusters*, apesar de não demonstrar alteração significativa em C1, apresenta um relevante aperfeiçoamento no grupo C2.

Com os dados de saída do *test and score*, obteve-se os resultados da matriz de confusão (*confusion matrix*) expostas na Figura 5.29. Esta figura mostra que 86,2% dos dados identificados pelo algoritmo em C1 e 92,8% em C2 foram adequadamente previstos. Por outro lado, 13,8% dos dados foram erroneamente classificados pelo algoritmo como pertencentes a C1 e 7,2% a C2. A Figura 5.30 constitui a tabela contendo quais cavidades a ferramenta considerou como mais relacionadas com o grupo vizinho do que ao próprio grupo classificado pelo *hierarchical clustering*. Tendo conhecimento de quais dados se encontravam deslocados, foi possível refinar o agrupamento demonstrado pelo *silhouette plot* e a posterior análise dos subgrupos.

		Predicted		Σ
		C1	C2	
Actual	C1	86.2 %	7.2 %	85
	C2	13.8 %	92.8 %	141
Σ		87	139	226

Figura 5.29 - Resultado da matriz de confusão.

Cluster	CAVERNA	Cluster (1)	Shouette (Cluster (1))	Cluster(Clusters)	p(C1)	p(C2)	A/P ratio	Volume específico	nsidade de passage	complexidade horia	Índice de redondeza	Cobertura area (Bow fig)	EW/DW ratio	S/L ratio	
1	C1	AP_0009	C1	-0.280115	C2	0.034188	0.965812	1.1076	2.94165	0.218715	4.92766	0.314683	0.451163	1.66267	
2	C2	RF_0014	C2	0.341525	C1	0.666667	0.333333	1.24535	4.20889	0.190291	1.08487	0.362307	0.591935	0.4546	2.07439
3	C1	FZ_0026	C1	-0.346515	C2	0.034188	0.965812	0.954406	3.84099	0.22908	2.77796	0.362954	0.45533	0.754174	1.10517
4	C2	N1_0116	C2	0.0608028	C1	1	0	0.955001	5.24146	0.137022	1.39107	0.371765	0.426963	0.66626	1.30234
5	C2	S11D_0022	C2	-0.0141304	C1	1	0	1.39658	5.43807	0.138332	1.91218	0.217341	0.415503	2.06282	2.37929
6	C1	SERP_0126	C1	-0.561922	C2	0.034188	0.965812	0.856994	2.97619	0.181591	1.92719	0.404003	0.475671	0.709573	1.13812
7	C1	CPMT_0016	C1	-0.328412	C2	0.0338983	0.966102	1.07999	3.86612	0.156391	2.70557	0.393854	0.438047	1.1284	1.19364
8	C2	N4WS_0007	C2	-0.128724	C1	1	0	0.720619	6.28871	0.120726	1.39343	0.232649	0.324563	2.5264	1.30509
9	C1	BR_0064	C1	-0.136129	C2	0.0403226	0.959677	1.25379	5.02049	0.145031	1.12623	0.561633	0.685036	0.879803	1.11599
10	C2	CX_0002	C2	0.377425	C1	1	0	1.26267	3.53739	0.15068	2.73484	0.352341	0.419782	1.65705	1.09917
11	C2	N4WS_0013	C2	-0.197587	C1	1	0	1.4082	6.20087	0.133244	2.25475	0.348304	0.49731	1.82689	1.20038
12	C1	RF_0071	C1	0.142864	C2	0.0406504	0.95935	0.89101	6.14693	0.214849	1.08845	0.542849	0.685455	0.850598	1.20961
13	C1	SB_0083	C1	0.172536	C2	0.0406504	0.95935	0.984374	6.21532	0.129377	1.21561	0.191045	0.31095	1	1.57769
14	C1	BR_0058	C1	0.367398	C2	0	1	0.6	9.9	0	0.2	0.4	0.4	0.31882	1.44116
15	C2	N1_0163	C2	-0.413329	C1	0.666667	0.333333	1.00895	10.9179	0.201522	1.14922	0.382723	0.552191	0.70459	1.57927
16	C1	APOL_0014	C1	-0.218597	C2	0	1	2.00694	4.36949	0.184982	2.07696	0.512551	0.653784	1.59379	1.11878
17	C2	AP_0013	C2	0.410675	C1	1	0	1.14935	3.81344	0.126693	1.84549	0.363133	0.415442	0.803426	1.29814
18	C2	APOL_0001	C2	-0.374493	C1	1	0	0.909684	7.82042	0.191845	1.42984	0.373915	0.488435	0.457966	1.29589
19	C1	MS_0021_0022	C1	-0.254285	C2	0.0178571	0.982143	0.894261	0.477983	0.391467	7.60229	0.178456	0.282602	1.10176	1.79669
20	C2	N2_0017	C2	-0.154767	C1	1	0	0.635885	6.31579	0.145981	0.65154	0.265124	0.460735	1	1.96014
21	C2	S11D_0021	C2	-0.175976	C1	1	0	0.770731	6.2069	0.188265	1.41474	0.306559	0.44477	1.18826	1.3494
22	C2	SB_0048	C2	0.386783	C1	1	0	1.4535	3.89148	0.154707	1.49596	0.263592	0.588226	1	2.52259

Figura 5.30 - Tabela de referente às classificações incorretas do modelo.

No caso dos objetivos propostos para a presente pesquisa, acredita-se a determinação de apenas dois *clusters* sugerida pelas análises do programa pode refletir em uma grande generalização das características morfológicas das cavidades. Assim, a análise de em baixa perplexidade de *sub-clusters* possibilitou a procura de características singulares em pequenos grupos e, posteriormente, buscar compreender sua relação com outros *sub-clusters* semelhantes.

Mesmo com a fragmentação de 17 para 28 clusters, foi possível observar que alguns agrupamentos foram mais eficientes do que outros no que se diz respeito à semelhança dos seus objetos. Em alguns casos foi possível identificar mais de um padrão em um mesmo grupo. Alguns grupos apresentaram características semelhantes, contudo foram classificadas como distintos. Desta forma, procurou-se definir padrões repetidos entre os agrupamentos. Neste processo notou-se a existência de morfologias aparentemente muito frequente, algumas supostamente provenientes de gênese mista e outras ainda não tão claras.

5.3 MORFOLOGIAS IDENTIFICADAS

As morfologias descritas a seguir foram identificadas visualmente a partir da repetição constatada nos *sub-clusters*. Vale ressaltar que o objetivo não foi enquadrar todas as cavidades da amostra em classificações morfogenéticas, mas sim, ressaltar as características de feições com formas claramente similares que se encontravam em um mesmo subgrupo ou em um grupo semelhante.

5.3.1. Abrigo semielíptico

Os abrigos no formato semielíptico (Figura 5.31) foram encontrados em alguns agrupamentos que contemplavam abrigos com altos resultados de taxa S/L e taxa EW/IW. Após análise de atributos qualitativos relacionados às cavidades com esta morfologia, concluiu-se que a forma pode estar relacionada à erosão de drenagem lateral que bordeja os afloramentos.

Apesar do conhecimento de que a rede de drenagem e a geomorfologia local podem ter se alterado significativamente desde a gênese das feições, das 15 cavidades fiéis ao formato semielíptico, 11 estão localizadas a menos de 50 metros da drenagem mais próxima. Consiste à hipótese, nove se localizam em baixa vertente, quatro em média vertente e apenas uma delas em alta vertente. Em relação à litologia, sete estão inseridas em canga, três no contato entre canga e formação ferrífera bandada e cinco apenas em formação ferrífera bandada. Dentro da amostra, esta morfologia se mostrou mais frequente no Quadrilátero Ferrífero, totalizando nove cavidades, enquanto seis foram constatadas na Serra de Carajás.

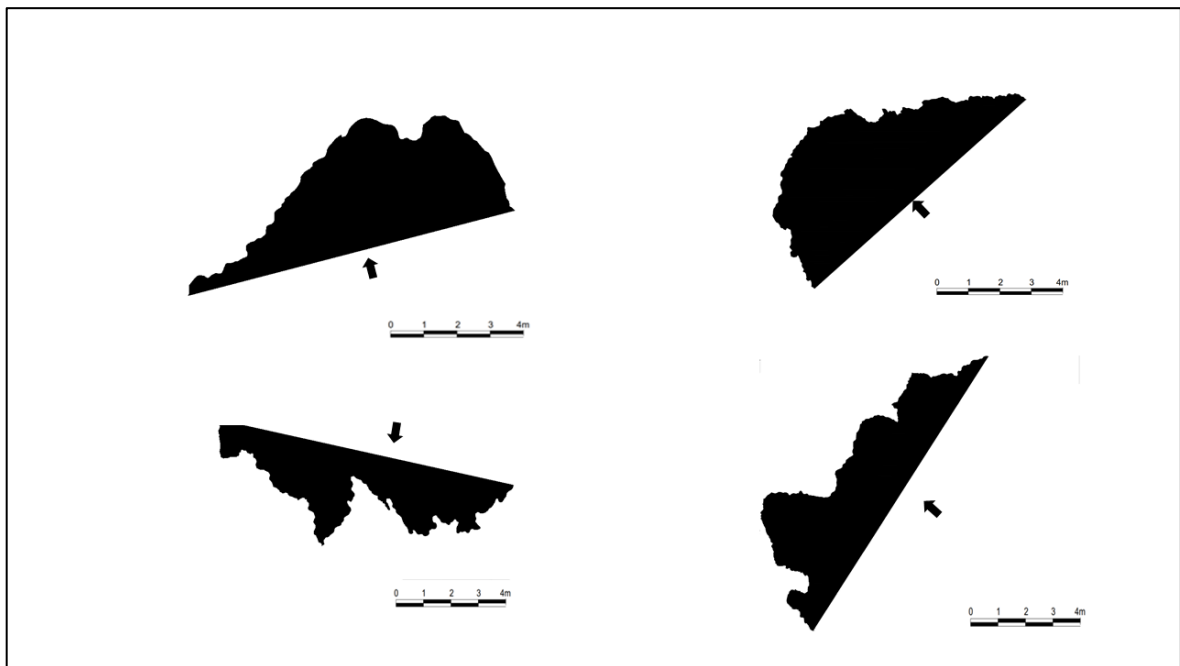


Figura 5.31 – Exemplos de abrigos considerados como semielípticos da amostra.

5.3.2. Cavernas reticuladas

Alguns dos grupos gerados pelo programa *Orange* separaram as cavidades aqui consideradas como reticuladas. Porém, em função da diversidade de características específicas como largura da entrada e do conduto e a existência de canalículos relevantes, houve problemas em algumas classificações geradas pelo computador. De qualquer modo, a principal característica que define a similaridade destas cavidades se refere à existência de um eixo principal (Figura 5.32 e Figura 5.33).

Dentro desta classificação, foram consideradas feições de conduto e entradas estreitas (alta taxa S/L e EW/IW próximo de 1), cavidades que seguem um eixo principal, mas possuem canalículos relativamente expressivos e entradas com dimensões superiores à maior largura (S/L médio e EW/IW de médio a alto), formas indicando a coalescência de cavidades predominantemente retilíneas, e outras com evidência de entradas interceptadas lateralmente (em seu maior eixo). Todas estas particularidades foram consideradas em um mesmo grupo pois a morfologia relativamente retilínea leva a crer que, inicialmente, estas feições foram desenvolvidas em uma zona de fraqueza estrutural da rocha (falha ou fratura).

Dentre todos os agrupamentos identificados, este apresenta o maior número de objetos, contemplando 72 feições. Quanto à distribuição destas cavidades, 62% se localizam no Quadrilátero Ferrífero e 38% na Serra de Carajás. Esta morfologia foi constatada em distribuição relativamente homogênea entre as três principais litologias consideradas (canga, contato canga/formação ferrífera bandada e formação ferrífera bandada) e preferencialmente em média e alta vertente respectivamente.



Figura 5.32 – Exemplo de cavidades reticuladas com possibilidade de gênese mista. A primeira pelas entradas diminutas em relação à maior largura e a segunda por aparente interceptação de câmara oclusa.

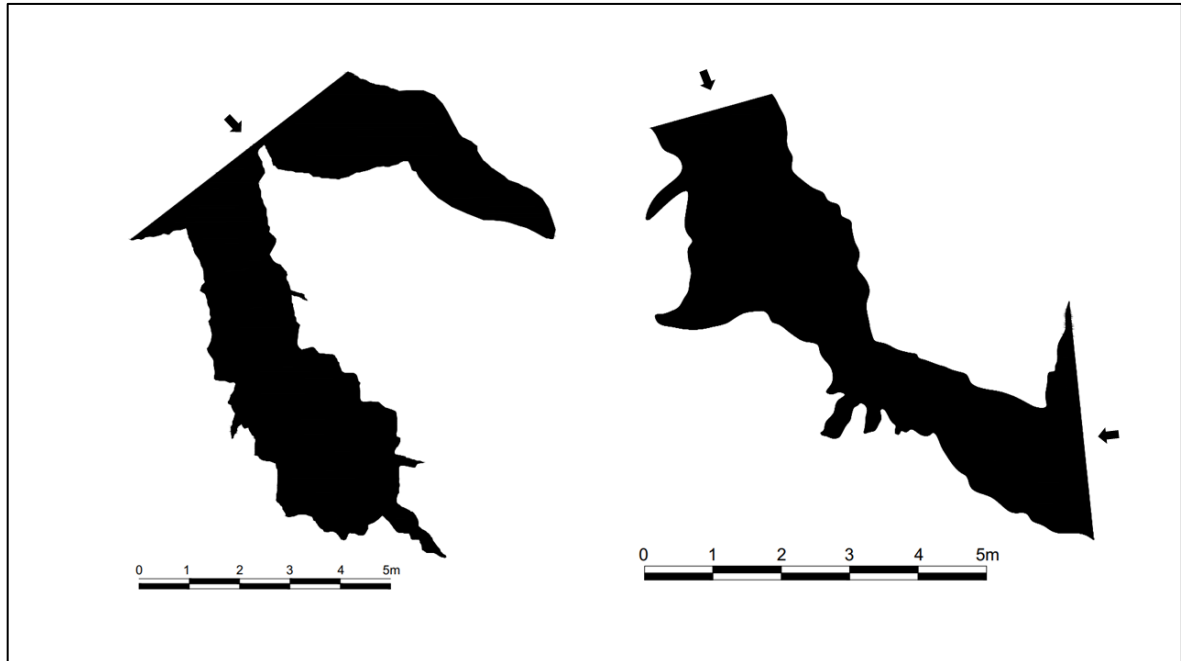


Figura 5.33 – A primeira cavidade representa a coalescência de duas feições retilíneas na entrada e a segunda ilustra uma aparente interceptação erosiva da feição nas duas extremidades do maciço.

5.3.3. Irregulares ou *chamber* / Gênese oclusa

Contradizendo à teoria de que a gênese de cavidades ferríferas está exclusivamente associada aos processos erosivos, a existência de feições cuja dimensão da entrada não é coerente com o seu desenvolvimento, representa um indício de que esta geoforma foi gerada inicialmente em ambiente ocluso, sem influência das frentes intempéricas externas. Estas cavidades podem estar associadas à gênese mineralogênica e condizem com os modelos estabelecidos por Auler e Piló (2005), no qual os autores atribuem a fase genética inicial ao ambiente ocluso e, apenas posteriormente com a formação de uma saída, predominariam os processos erosivos. Outra possibilidade diz respeito à biogênese hipogênica a partir de reações redutoras por bactérias, discutido no artigo de Auler *et al.* (2019).

Dentre as cavidades com esta característica, é possível estabelecer três grupos distintos, sendo estes: cavidades irregulares, as *chamber caves* e as feições aparentemente provenientes de gênese mista que serão expostas na seção destinada às mesmas. De certa forma, todas as cavidades apresentaram mais de um processo ao longo de seu desenvolvimento, porém, a morfologia destas feições indica que antes da erosão estabelecer um acesso, as cavidades já existiam no interior do maciço.

As cavidades consideradas como oclusas irregulares apresentam composição morfológica variada, podem conter vários condutos (Figura 5.34) ou apenas um salão com canalículos associados a pequenos condutos (Figura 5.35). Em alguns casos, foi possível associar as feições à morfologia espongiforme descrita por Palmer (1991) como produto de espeleogênese hipogênica (Figura 5.34). Possuem distribuição homogênea entre as duas Províncias Espeleológicas. Já em termos litológicos, a maioria está hospedada no contato entre canga e formação ferrífera bandada, na alta e média vertente, respectivamente. De qualquer modo, como já mencionado, a característica que mais chama a atenção neste grupo de feições refere-se à relativa pequena dimensão da entrada, ou seja, baixa taxa EW/IW. A complexidade das formas em relação à tendência de desenvolvimento difuso resultou em taxas S/L baixas, além do índice de complexidade horizontal e taxa A/P de médio a alto nas componentes.

Em relação às cavidades denominadas como *chamber caves* oclusas, observou-se uma diferença morfológica significativa em relação ao grupo anteriormente citado. O formato arredondado e a ausência de pilares são características complementares à relativa exígua entrada (Figura 5.36). Das cinco cavidades que claramente dispuseram deste atributo, quatro encontram-se na Serra de Carajás, especificamente no Distrito Espeleológico de Serra Leste. Por se tratar de um grupo muito pequeno, a predominância litológica desta morfologia é inconclusiva, visto que duas estão na canga, uma no contato entre canga e formação ferrífera bandada e duas em formação ferrífera bandada. Isso também é considerado para posição na vertente, em que três foram identificadas em média vertente, uma em alta e uma em baixa. Mesmo em baixo número de objetos, vale ressaltar que a maior cavidade deste grupo possui apenas 34 metros de projeção horizontal. Como esperado, os objetos deste grupo apresentaram baixas taxas de EW/IW, além disso, o formato tendenciosamente circular resultou em baixas taxas S/L e alto quociente de índice de redondeza.

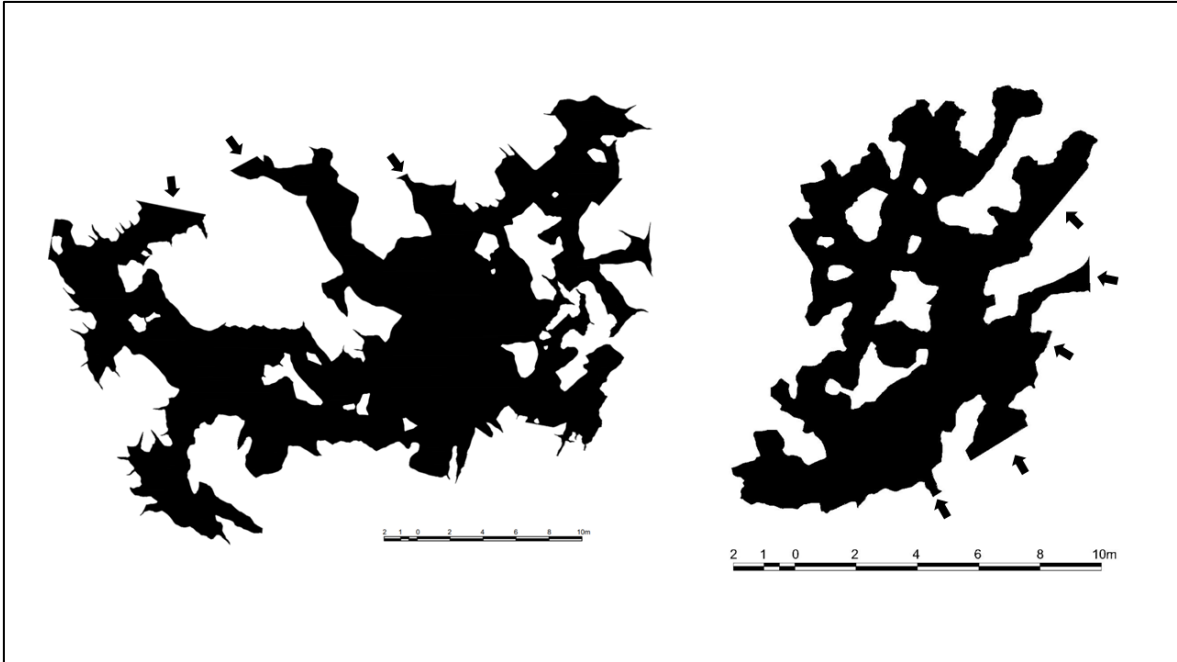


Figura 5.34 – Cavidades irregulares oclusas semelhantes às cavernas espongiiformes hipogênicas descritas por Palmer (1991).



Figura 5.35 – Cavidades irregulares oclusas com salão principal associado a pequenos condutos.

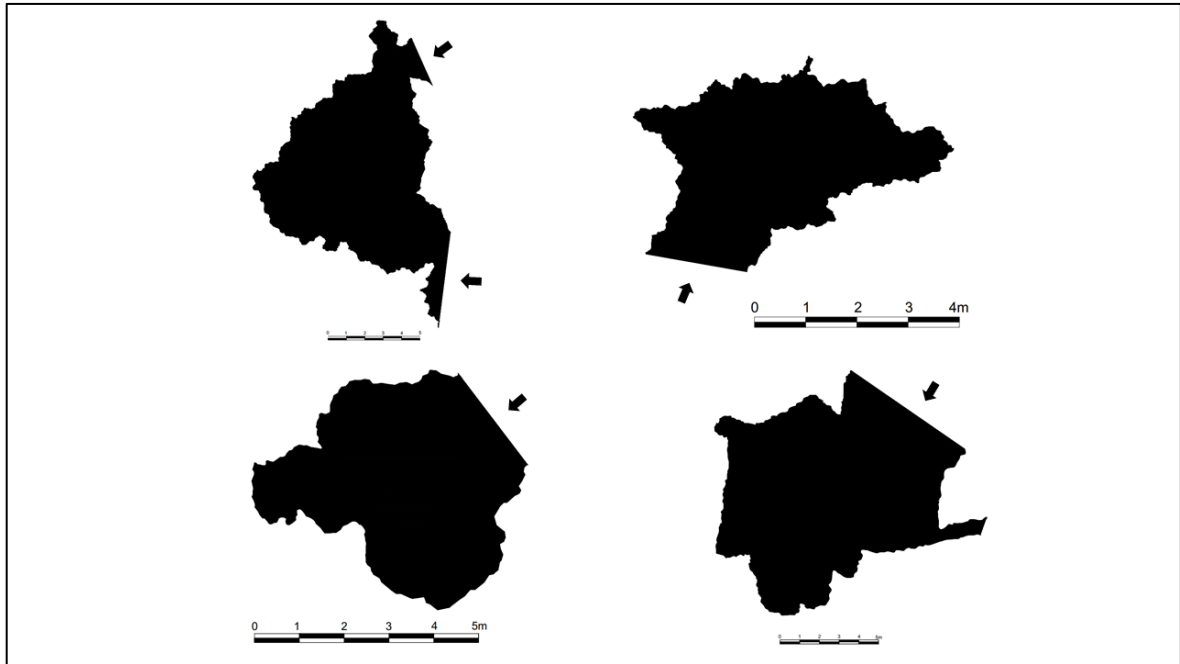


Figura 5.36 – Exemplo de cavidades oclusas no formato *chamber*.

É importante considerar que ao utilizar o tamanho da entrada das cavidades como indício de gênese oclusa, identifica-se apenas aquelas que mantiveram seus acessos diminutos até o momento, não sendo ampliados pela frente erosiva ou desabamentos na entrada. Assim, outras cavidades podem ter sido submetidas à gênese, não sendo possível a identificação a partir da referida característica.

5.3.4. Cavidades triangulares

Na amostra, as cavidades triangulares estão frequentemente associadas a abrigos, mas também há presença de cavernas com as mesmas características morfológicas. Em todo caso, estas feições representam pequenas cavidades sendo que na amostra, 21 de um total de 23 feições com forte aparência triangular contam com menos de 30 metros de projeção horizontal, e apenas duas possuem projeção horizontal no intervalo entre 30 e 100 metros.

As cavidades triangulares normalmente contam com a presença de um microcanal (canalículo) principal em posição distal (Figura 5.37). Segundo Calux (2013), a presença destas feições espeleogenéticas neste contexto, sugerem que o vetor de desenvolvimento da cavidade direciona-se ao interior do maciço rochoso.



Figura 5.37 – Exemplo de cavidades triangulares, sendo as duas superiores cavernas e as duas inferiores abrigos.

Quanto à localização, treze encontram-se na Serra dos Carajás, enquanto dez foram constatadas no Quadrilátero Ferrífero. Estas feições foram identificadas nas três principais litologias consideradas, sendo dez localizadas em canga, oito no contato entre canga e formação ferrífera bandada e cinco em formação ferrífera. A sua distribuição quanto à posição na vertente supostamente predomina no topo ou alta vertente com onze cavidades, seguido por média e baixa vertente com seis cavidades.

Dada as características obtidas, infere-se que algumas cavidades tipicamente triangulares podem estar associadas à erosão em cabeça de drenagem. Esse tipo genético requer análise de perfil, visto que uma das características relevantes se refere ao gradiente hidráulico. Por outro lado, a predominância em alta e média vertente, além da posição distal de evolução dos canalículos, sugere erosão remontante, também apontados por Dutra (2013) como características frequentes nesse processo genético.

O formato triangular é composto majoritariamente pela entrada da cavidade como base, sendo assim, o valor de EW/IW das feições com esta morfologia é elevado. Por outro lado, associando às características da entrada com a tendência de baixa projeção horizontal, a taxa S/L apresenta resultados relativamente baixos nos abrigos. Como estas cavidades são compostas por apenas um salão, a densidade de passagens é consideravelmente baixa. Já a taxa A/P é baixa quando o formato triangular é mais longo do que largo (caverna) ou possui características de perímetro irregular e canalículo profundo. A mesma taxa é elevada quando a cavidade é mais larga do que longa (abrigo), com forma regular e canalículo em estágio de evolução menos avançado.

5.3.5. Abrigos retangulares

Os abrigos com formato retangular (Figura 5.38) constatados na amostra se concentram predominantemente na Serra dos Carajás. Entre as 14 cavidades neste formato, apenas duas estão hospedadas no Quadrilátero Ferrífero. Assim como as feições triangulares, estes abrigos se localizam, preferencialmente, em alta e média vertente respectivamente.

Como há de se esperar, a taxa EW/IW deste grupo se aproxima de um, considerando que a maior largura de um abrigo sempre será a sua própria entrada. Apenas duas cavidades deste grupo detêm mais de 30 metros de projeção horizontal e uma pequena parcela se posiciona próxima a alguma drenagem. Considerando a baixa dimensão das cavidades que compõe este grupo, o índice de complexidade horizontal apresenta baixo resultado.



Figura 5.38 – Exemplos de abrigos identificados como retangulares.

5.3.6. Paleotocas

Dois cavidades da amostra foram anteriormente identificadas como paleotocas, sendo que uma, anteriormente citada, se localiza na Serra dos Carajás (S11_0007) e a outra no Quadrilátero Ferrífero (AP_0038) (Figura 5.39). Quanto à litologia, a cavidade S11_0007 hospeda-se em ferricrete, enquanto a AP_0038, inserida no Quadrilátero Ferrífero, localiza-se no contato entre canga e formação ferrífera bandada, seguindo a condicionante da presença de substrato friável. Ambas as cavidades possuem entradas relativamente pequenas comparadas às suas expressivas dimensões e apresentam morfologia planimétrica esponjiforme. A identificação destas feições através de morfometria é apenas possível com a utilização de parâmetros 3D, pois suas particularidades morfológicas estão principalmente associadas ao formato dos condutos e não há como, através de mapas espeleotopográficos, prever o comportamento dos vetores de desenvolvimento que foram utilizados pelo animal.



Figura 5.39 – Paleotocas constatadas na amostra.

5.3.7. Gênese mista/ coalescência

Após repetidas análises dos mapas espeleotopográficos, constatou-se a significativa presença de morfologias que apontam evidências para a gênese mista e ampliação por coalescência de duas cavidades. Apesar de um agrupamento identificado pelo *software* contemplar apenas cavidades neste cenário, a constante presença de indícios indicando associação de processos, gerou erro em algumas classificações por representarem a composição de morfologias provenientes de desenvolvimento singular. Desta forma, apesar de ser possível identificar determinados padrões semelhantes que aparentemente foram submetidos a processos análogos, uma significativa parcela destas cavidades não se enquadra em nenhuma classificação por possuir morfologia ímpar. Foi possível identificar cavidades vizinhas com morfologia semelhante que se conectaram (Figura 5.40), bem como, por exemplo, observar abrigos que se conectaram com cavidades inicialmente oclusas (Figura 5.41). Uma das evidências que levantaram a esta hipótese diz respeito aos estreitos acessos entre duas câmaras com características distintas que, aparentemente, se desenvolveram desassociados através de processos distintos.

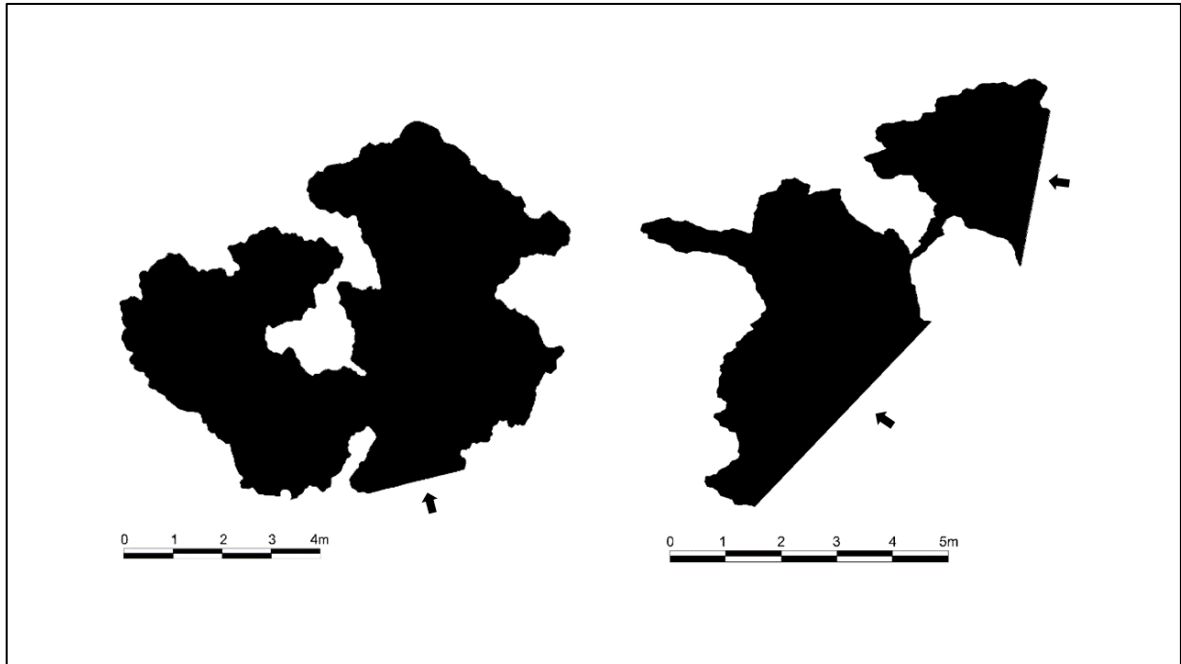


Figura 5.40 - Feições resultantes de possível coalescência de cavidades de mesma gênese. A primeira referente à união de duas cavidades oclusa e a segunda a junção por canalículos de dois abrigos possivelmente gerados por erosão.



Figura 5.41 - Exemplo de cavidades de gênese mista. Intercepção de abrigo com cavidades inicialmente oclusas através de canalículo ou conduto.

5.4 DISCUSSÕES COMPLEMENTARES

Com a aplicação e análise individual e agregada dos parâmetros propostos, é possível concluir que estes índices assimilaram principalmente a separação entre cavidade labirínticas e *chamber caves*. Dentro dos contextos com os quais estes índices foram desenvolvidos, predominantemente ao carste tradicional, essa divisão é satisfatória, pois possibilita diferentes interpretações naqueles ambientes. Porém, a variabilidade morfológica com a qual as cavidades ferríferas se encontram vai além desta dualidade, inclusive pela pequena quantidade de cavernas aparentemente labirínticas constatadas nesta litologia. De qualquer modo, mesmo com a tendência análoga dos objetivos da maioria dos parâmetros, foi possível identificar diferentes padrões de distribuição dos objetos de estudo em cada gráfico de dispersão.

Ainda em relação aos resultados possibilitados pelas análises morfométricas propostas, uma relevante observação diz respeito à ocorrência geográfica dos padrões morfológicos apontados. Apesar das diferentes proporções, todos os padrões aqui citados foram identificados nas duas províncias espeleológicas, concluindo-se assim que, mesmo com as diferenças relacionadas à composição litológica e climática, os processos que levaram à gênese das cavidades ferríferas no Quadrilátero Ferrífero e na Serra dos Carajás são próximos ou equivalentes.

Logo, e resgatando os tipos de gênese explorados no capítulo 2, foi possível inferir que:

- 1) A identificação das cavernas em tálus é facilmente realizada em campo, mas dada a gama de possibilidades morfológicas geradas nos depósitos, sua identificação se mostrou inconclusiva em planta, principalmente no que se refere à análise 2D;
- 2) Em relação à ocorrência da gênese relacionada à bioredução, a identificação de feições proveniente deste processo não foi possível. Para que isto se torne possível será necessário aprofundar os estudos, pois ainda não se conhece como a bioredução de fato impacta na morfologia das cavidades. Desta forma, não foi identificado a divergência do que são cavernas mineralogênicas daquelas iniciadas pela biogênese;

- 3) Referente às paleotocas, a identificação destas feições apenas foi realizada pois a gênese de ambas as cavidades já era conhecida através de dados de campo. Para a detecção deste tipo de feição é imprescindível a consideração de parâmetros 3D que caracterizem adequadamente o formato dos condutos;
- 4) Por fim, a identificação de feições provenientes de cada tipo de gênese por erosão citados no capítulo 2 se mostrou inconclusiva, sendo apenas possível identificar com clareza aquelas provenientes de erosão em margem de drenagem com características atualmente típicas. Esta questão ressalta a necessidade de se desenvolver parâmetros apropriados para a interpretação das cavidades ferríferas, visto que grande parte da amostra foi composta por abrigos de variável morfologia.

6 CONCLUSÕES

A análise dos parâmetros morfométricos apresentou resultados construtivos e permitiu ampliar a investigação e levantar hipóteses a respeito das classes morfogenéticas relacionadas às cavidades ferríferas do Brasil. Porém, acredita-se que para o sucesso finalmente concreto destes estudos, parâmetros específicos devem ser desenvolvidos de forma a contemplar a especificidade das formas que constituem os ambientes ferríferos.

Concluiu-se ao longo do desenvolvimento da pesquisa que, a investigação dos parâmetros em 2D limitou a maximização da exploração de dados, visto que alguns tipos genéticos se caracterizam mais pelo formato do seu salão/conduto do que por sua disposição em planta. Porém, há de se considerar que para atingir uma confiabilidade satisfatória de dados como volume, é necessário utilizar instrumentos com tecnologia que minimize o erro da medição, como os *laser scanner*. A falta de dados exatos de volume, sem dúvidas, constituiu um dos fatores limitantes da atual tentativa de classificação.

Quanto à avaliação da aplicação de dados morfométricos para a classificação morfogenética das cavidades ferríferas, é possível afirmar que os parâmetros permitiram o agrupamento de cavidades em relação a uma ou mais características morfológicas. Entretanto, a associação de todos os parâmetros possivelmente remeteu inicialmente a agrupamentos com mais de um tipo de morfologia e a grupos distintos de cavidades semelhantes. Por outro lado, mesmo com a necessidade de uma classificação supervisionada, a análise do resultado do modelo pelo t-SNE possibilitou a identificação de subgrupos coerentes, visto que a partir da repetição morfológica entre os grupos, notou-se a existência de possíveis sete padrões morfológicos. Além disso, considera-se que a evidente existência de cavidades provenientes de mais de um processo genético expressivo ao longo de seu desenvolvimento representam um desafio no que diz respeito à mecanização da classificação morfológica das cavidades ferríferas. Em paralelo, a este já grande desafio deve ser acrescentado um outro: o fato de que as cavidades investigadas são fósseis e em seu processo de degradação, muitas de suas características morfogenéticas podem ter sido mascaradas de diferentes modos.

Por fim, a tendência de divergência a respeito do domínio morfológico predominante na localização das cavidades entre o Quadrilátero Ferrífero (média vertente) e a Serra dos Carajás (alta vertente) aparentemente se associa às características geomorfológicas distintas, resultantes de diferentes eventos nos quais o substrato das áreas foram submetidos. Por outro lado, a identificação das mesmas morfologias no Quadrilátero Ferrífero e na Serra dos Carajás, leva a crer que os processos envolvidos na gênese das cavidades destas duas áreas são similares ou idênticos. Isto, por si só, já é um resultado muito promissor, pois demonstra que há processos específicos e determinantes para a morfogênese destas geoformas e havendo-os, não de haver geoformas relacionadas a eles.

7 REFERÊNCIAS

- ALKMIM F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29–58, 1998.
- ALMEIDA, F. F. M et al. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Review*, v.17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.
- AULER, A.; PILÓ, L. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. *O Carste*, Belo Horizonte, v.17, n.3, p. 70-72, 2005.
- AULER, A.; PILÓ, L.; SAADI, A. Ambientes Cársticos. In: SOUZA, C. R. G.; OLIVEIRA, P. E.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S. Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto, Brasil: Holos, p. 321–337, 2005.
- AULER, A.; PILÓ, L. Geoespeleologia. In: Curso de espeleologia e licenciamento ambiental. Brasília. Cap. 2, p. 25-44, 2011.
- AULER, A.; PILÓ, L. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: Anais XXX Congresso Brasileiro de Espeleologia, Montes Claros, 181-186, 2009.
- AULER, A.; PILÓ, L.; PARKER, C.; SENKO, J.; SASOWSKY, I.; BARTON, H. Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes? p. 15–19, 2014.
- BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A. L.; DRUMMOND, N. F.; RUFF, A. W.; TREMAINE, J. W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 3(4): 215-242, 1973.
- BETTÚ, D.; SOARES, P. Interpretação Geomorfométrica de Parâmetros Variográficos do Relevo. *Geociências*, v. 32, p. 118–136, 2013.
- BEHLING, H.; LICHTÉ, M. Evidence of dry and cold climatic conditions at glacial times in tropical Southeastern Brazil. *Quaternary Research*, 48: 348-358, 1997.
- BIONDI, J. C. Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. Oficina de textos, 528 p, 2003.
- BOAVENTURA, R. S. Geomorfologia da Folha Tocantins.... In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1974.
- CALUX, A.; CASSIMIRO, R. Geoespeleologia das Cavernas em Rochas Ferríferas: Aspectos Dimensionais, Morfológicos, Hidrológicos e Sedimentares. In: Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas. São Paulo: SBE, p. 134–159, 2015.

- CALUX, A.; CASSIMIRO, R; SALGADO, A. A. R. Caves in iron formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, southeastern Brazil: lithological, morphological and hydrological settings and speleogenesis. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.62/2, p.125-144, 2019.
- CANIE – Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Banco de Dados Digital. 2019.
- CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M. e TEIXEIRA, W. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia. *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto – REM* v.48. p. 264-274, 1995.
- CHEMALE, F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research* 65:25–54, 1994.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. S. Metalogênese do Brasil. Brasília, Editora Universidade de Brasília / CNPq, 392p. 2001.
- DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, p. 29–35, 2003.
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, Anexo aos anais, 11-54, 1988.
- DORR, J. V. N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil. p. 117, 1969.
- DUTRA, G. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas, *In: Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas*, SBE, SP, p. 158-173, 2015.
- EVANGELISTA, H. J. e MÜLLER, G. Petrology of a transition Zone between the Archean craton and the Coast Belt, SE of the Iron Quadrangle, Brazil. *Chem. Erde*, 45:129-145, 1986.
- FRUMKIN, A.; FISCHHENDLER, I. Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology*, v. 67, n. 3–4, p. 457–471, abr. 2005.
- GOLDER ASSOCIATES. Estudo de Impacto Ambiental Projeto Ferro Carajás S11D. Vol II-A. 547p, 2010.
- GOUDIE, A. S. *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, New York. 1202p, 2004.
- HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. *In: São Francisco Craton, Eastern Brazil*. Cham: Springer International Publishing, p. 321–331, 2017.
- HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A. A. C.; MEIRELES, E. DE M. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In: Anais I Simpósio de Geologia da Amazônia*, Belém 1, p. 100-110, 1982.

- ICMBIO. Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás. Capítulo 3 – Manejo e Desenvolvimento Sustentável – Zoneamento, 2003.
- KLIMCHOUK, A. Unconfined versus confined speleogenetic settings: variations of solution porosity. *International Journal of Speleology*, v. 35, n. 1, p. 19–24, jan. 2006.
- KÖPPEN, W. *Climatologia con un estudio de los climas de la Tierra*. México: Fondo de Cultura Económica. 479p, 1948.
- LANA, C.; ALKIMIM, F. F.; ARMONSTRONG, R.; SCHOLZ, R.; ROMANO, R.; NALINI Jr., H.R. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, Southeast Brazil. *Precambrian Research* 231, 157–173, 2013.
- MACAMBIRA, J. B. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Tese de doutorado - Campinas/SP - Brasil: Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- MACAMBIRA J. B.; RAMOS J. F. F.; ASSIS J. F. P.; FIGUEIRAS A. J. M. Projeto Serra Norte. Conv. Seplan/DOCEGEO/UFPA. Projeto Pojuca. Convênio DNPM/DOCEGEO/UFPA. Relatório Final. 150p, 1990
- MAURITY, C. W.; KOTSCHUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. Série Ciências da Terra* 7: 331-362, 1995.
- MCFARLANE, M. J.; TWIDALE, C. R. Karstic features associated with tropical weathering profiles. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementary Band* 64: 73-95, 1987.
- MEDINA, A. I.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Projeto APA Sul RMBH: geomorfologia, mapa geomorfológico, escala 1:50.000 em 3 partes. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM. 54p. v.: 1 mapa, 2005.
- MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; SOUZA FILHO, C. R.; MORETO, C. P. N. Metalogênese da Província Carajás. *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*[S.l: s.n.], p. 43-92, 2014.
- PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, p. 1–21, 1991.
- PARDO-IGUZQUIZA, E.; DURÁN-VALSERO, J. J.; RODRÍGUEZ-GALIANO, V. Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits. *Geomorphology*, v. 132, n. 1–2, p. 17–28, set. 2011.
- PARKER, C. W.; WOLF, J. A.; AULER, A. S.; BARTON, H. A.; SENKO, J. M. Microbial Reducibility of Fe(III) Phases Associated with the Genesis of Iron Ore Caves in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. *Minerals*, 3:393– 411, 2013.

- PARKER, C. W.; AULER, A. S.; BARTON, M. D.; SASOWSKY, I.D.; SENKO, J. M; BARTON, H. A. Fe(III) Reducing Microorganisms from Iron Ore Caves Demonstrate Fermentative Fe(III) Reduction and Promote Cave Formation. *Geomicrobiology Journal*, p. 1-12, 2017.
- PEREIRA, M. C.; RODET, J. G. M. A.; SALGADO, A. A. R. Aspectos genéticos e morfológicos das cavidades naturais da Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 4, 465-476.
- PICCINI, L. Recent developments on morphometric analysis of karst caves. *Acta Carsologica*, v. 40, n. 1, 1 maio 2011.
- PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Geoespeleologia das Cavernas em Rochas Ferríferas da Região de Carajás, PA. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Espeleologia, Montes Claros*, p. 181-186, 2009.
- PINHEIRO, R. V. L.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MAURITY, C.W. Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA). Grupo Espeleológico Paraense. Relatório inédito, 38p, 1985.
- PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C.W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. *Anais 1o Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, Belo Horizonte*, p. 179-186, 1988.
- PORTO, M. L.; SILVA, M. F. F. Tipos de vegetação metalófila em áreas da Serra dos Carajás e de Minas Gerais, Brasil. *Acta Botânica Brasileira* 3(2). p.13-21, 1989.
- RIBEIRO, D. T. *Enriquecimento Supergênico de Formações Ferríferas Bandadas: Estruturas de Colapso e Desordem*. 124p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- ROTH, M.J., 2004: *Inventory and geometric analysis of flank margin caves of the Bahamas*. MsS. Thesis, Mississippi State University, pp. 117.
- ROTH, M.J., Mylroie, J.E., Mylroie, J.R., Ersek, V., Ersek, C.C. e J.L. Carew, 2006: Flank Margin Cave Inventory of the Bahamas.- In Davis, R.L. e D.w. Gam- ble (eds.) *Proc. 12th Symposium on the geology of the Bahamas and Other Carbonate Regions*, 153–161, San Salvador, Bahamas.
- RUCHKYS, U.; BITTENCOURT J.; BUCHMANN, F. A paleotoca da Serra do Gandarela e seu potencial como geossítio do Geoparque Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Caderno de Geografia*, v. 24(42), p. 249-263, 2014.
- SAINTE-HILARE, A. Viagem pelo Distrito dos Diamantes e litoral do Brasil. Editora Itatiaia/USP, 233p, 1974.
- SALGADO, A. A. R. *Estudo da Evolução do Relevo do Quadrilátero Ferrífero, MG, através da mensuração dos processos erosivos e denudacionais*. Tese de Doutorado - UFOP, Ouro Preto, 2006.

- SALGADO, A. A. R./ CARMO, F.F. 'Quadrilátero Ferrífero': A Beautiful and Neglected Landscape Between the Gold and Iron Ore Reservoirs. In: VIEIRA, B.C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C., 2015.
- SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura greenstone Belt da Série Rio das Velhas, Quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife, 1978. Anais SBG 1, p.292-293, 1978.
- SILVA, F. R. *A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia*. 2007. 144p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- SIMMONS, G. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The National Speleological Society Bulletin, v. 25, p. 66–72, 1963.
- SIMMONS, G. Leucophosphite, a New Occurrence in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The American Mineralogist, v. 49, p. 377–386, 1964.
- STPC. 2003. Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás.
- TOLBERT, G. E.; TREMAINE, J. W.; MELCHER, G. C.; GOMES, C. B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. Economic Geology 66: 985-994, 1971.
- U.S. Geological Survey (2019). Mineral Commodity Summaries: February 2019.
- VARAJÃO, C. A. C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geociências, v. 21, n. 2, Rio de Janeiro/RJ, p.138-145, 1991.
- VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER R.; COLIN, F.; NALINI Jr., H. A. Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (^{10}Be) e da pedogênese. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 5, 1409-1425, 2009.
- VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008. 328p, 2008.
- VERPLANCK, P. L; YAGER, D. B; CHURCH, S. E; STANTON, M. R. Ferricrete Classification, Morphology, Distribution, and Carbon-14 Age Constraints. Geological Survey Professional Paper 1651, v. 2, 723-744, 2007.
- ZUCCHETTI, M. 2007. *Rochas máficas do grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 E N5, Carajás, PA*. 165p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2007.