

Mestrado Profissional

Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

Rafael dos Santos Scherer

**OCORRÊNCIA DE ESPELEOTEMAS FOSFÁTICOS E
FEIÇÕES MORFOLÓGICAS RARAS EM CAVERNAS
FERRÍFERAS DA SERRA DE CARAJÁS, NO PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Orientador:
Dr. Pedro Walfir Martins Souza Filho
Dr. Luís Beethoven Piló

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do ITV – Belém-PA**

S326o

Scherer, Rafael dos Santos.

Ocorrência de espeleotemas fosfáticos e feições morfológicas raras em cavernas ferríferas da Serra de Carajás, no Pará. / Rafael dos Santos Scherer -- Belém-PA, 2017.

112 f.: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2015.

Orientadores: Prof. Pedro Walfir Martins Souza Filho e Luís Beethoven Piló.

1. Espeleotemas. 2. Morfologias. 3. Cavernas ferríferas. 4. Serra dos Carajás. I. Título.

CDD 23. ed. 551.447

Rafael dos Santos Scherer

Ocorrência de espeleotemas fosfáticos e feições morfológicas raras em cavernas ferríferas da Serra de Carajás, no Pará.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Data da aprovação: 10/04/2017

Banca examinadora:

Dr. Pedro Walfir Martins Souza Filho
Orientador - Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto
Membro interno - Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Paulo Fernando P. Pessoa
Membro externo – Hidrovia Hidrogeologia e Meio Ambiente

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas mais presentes em minha vida e que sempre acreditaram na conclusão desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, José e Maria, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade. Isso só me fortaleceu e me fez tentar não ser o melhor, mas sempre tentar fazer o melhor.

Aos meus irmãos Caroline e Bruno pela contribuição, minha eterna gratidão.

A minha esposa e filho por serem tão importante na minha vida. Sempre a meu lado, me fazendo acreditar que posso ir muito mais que imagino.

Ao amigo, tutor, parceiro de cavernada e orientador Luís B. Piló pelos ensinamentos.

Ao meu orientador Dr. Pedro Walfir pela paciência, liberdade na condução da pesquisa, revisões, cobranças e ensinamentos.

Ao meu amigo Airton Barata pelo apoio incondicional, parceria nos trabalhos de campo, conversas e discussões.

Aos cavernosos Allan Calux, Ataliba Coelho, Georgete Dutra, Xavier Prous, Augusto Auler, Amailton Pedrosa, Marcos Pereira, Gislene Rios, Robson Zampaulo, Daniela Silva, Tatiane Monteiro e tantos outros não menos importantes. Nossas incursões sempre foram muito mais que diversão.

À Fundação Casa da Cultura de Marabá, em especial ao Noé Von Atzingen que me repassou as primeiras instruções e ensinamentos sobre espeleologia e região amazônica.

À empresa Vale pela oportunidade de desenvolvimento e financiamento, em especial ao Lúcio Cavalli, Rodrigo Dutra Amaral e Iuri Viana Brandi.

Ao Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável pelo apoio na pesquisa e condução desta pesquisa.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, em especial a Jocy Cruz, Zeca Reino e André Ribeiro.

A todos os amigos de trabalho e da 1ª e 2ª turma de mestrado profissional do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável, por todo o apoio dispendido, em especial a Roseane Barata e ao nosso amigo Breno Versiani que deixou muitas saudades.

RESUMO

Em pouco mais de 10 anos, a região de Carajás se tornou a maior província espeleológica de cavernas ferríferas (formação ferrífera e canga) do país. Atualmente são conhecidas aproximadamente 2.300 cavernas. No entanto, uma parcela destas cavernas desenvolveu feições morfológicas distintas e espeleotemas diferenciados, considerados raros, incluindo estalagmites, colunas e estalactites de fosfatos, além de coralóides com reduzida ocorrência. O objetivo deste trabalho é aprofundar o conhecimento sobre as feições morfológicas distintas e espeleotemas raros estudando sua mineralogia e morfologia. Para isso, foram realizados estudos cartográficos, geoespeleológicos e mineralógicos em sete cavernas visando uma melhor compreensão da origem e evolução desses depósitos químicos e feições morfológicas. Para investigar a mineralogia dos depósitos químicos foram utilizados métodos de difração de raio-X e fluorescência de raio-X. A análise morfológica foi realizada a partir dos levantamentos topográficos em nível 5D e estudos geoespeleológicos. Estas avaliações permitiram identificar cavernas com apenas câmaras compostas constituídas por mais de um compartimento. Planimetricamente as sete cavernas se enquadraram no padrão espongiforme. As seções longitudinais mostraram cavernas com pisos inclinados, concordantes com a vertente. Todas apresentam drenagem perene ou temporária onde se acumulam águas pluviais que participam do escoamento subsuperficial das encostas. O gotejamento e o escoamento são os principais responsáveis pela geração de diversas feições nos pisos e nas paredes. O guano existente nas cavernas, possivelmente, é o responsável pela geração da expressiva acidez da água que circula nessas cavernas. Os processos que formam esses espeleotemas e feições raras são, principalmente, biogênicos e estes são formados quase que exclusivamente de fosfato. Os principais minerais fosfáticos identificados foram: francoanellita, fosfosiderita, fosfato de cálcio, leucofosfita, newberyita, sfeniscidita, variscita e strengita. No grupo dos fosfatos ocorreram dois minerais raros, a Francoanellita e a Newberyita, ambos com pouca ocorrência no mundo e registrados pela primeira vez no Brasil.

Palavras-chaves: espeleotema, morfologia, cavernas ferríferas, Serra dos Carajás.

ABSTRACT

In a little more than 10 years, Carajás region has become the largest speleological province of iron formation caves in the country. About 2,300 caves are currently known. However, a portion of these caves developed distinct morphological features and differentiated speleothems, considered rare, including stalagmites, columns and stalactites of phosphate, as well as choriorids with reduced occurrence. The objective of this work is to deepen the knowledge about the distinct morphological features and rare speleothems studying its mineralogy and morphology. For this, cartographic, geospeleological and mineralogical studies were carried out in seven caves in order to better understand the origin and evolution of these chemical deposits and morphological features. To investigate the mineralogy of the chemical deposits, methods of X-ray diffraction and X-ray fluorescence were used. The morphological analysis was performed from topographic surveys at 5D level and geospeleological studies. These evaluations allowed to identify caves with only composite chambers consisting of more than one compartment. Planimetrically the seven caves fit the spongiform pattern. The longitudinal sections showed caves with inclined floors, concordant with the slope. All of them present perennial or temporary drainage where rainwater accumulates and participate in the subsurface flow of the slopes. Drip and drainage are the main responsible for the generation of diverse features on floors and walls. The guano in the caves is possibly responsible for generating the expressive acidity of the water circulating in these caves. The processes that form these speleothems and rare features are mainly biogenetic and these are formed almost exclusively of phosphate. The main phosphatic minerals identified were: francoanellite, fosfosiderite, calcium phosphate, leucophosphite, newberyite, spheniscidite, variscite and strengite. In the phosphate group, two rare minerals, Francoanellita and the Newberyita, both with little occurrence in the world and registered for the first time in Brazil.

Keywords: speleothems, morphologies, iron caves, Serra dos Carajás

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Serra dos Carajás (em vermelho). Fonte: Google Earth ...	18
Figura 2: Planalto residual de Carajás; platô de Serra Sul recoberto pela savana. Foto: João Rosa	20
Figura 3: Localização das cavernas amostradas nas Serras Sul e Norte.	22
Figura 4: Método para calcular a projeção horizontal.....	25
Figura 5: Método para calcular o desnível	25
Figura 6: Método para calcular a área.....	26
Figura 7: Método para calcular o volume.	27
Figura 8: Classificação planimétrica proposta por Palmer (1991; 2003).	27
Figura 9: Quadro espeleogenético esquemático para as cavernas da Serra dos Carajás (PA). Pinheiro et al. (1985).....	32
Figura 10: Esquema evolutivo para as cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás. Fonte: Pinheiro & Maurity (1988)	32
Figura 11: Classificação proposta por Palmer (1991).	35
Figura 12: Classificação planimétrica proposta por Palmer (2003)	35
Figura 13: Exemplos de configurações planimétricas registradas nas cavernas estudadas em S11C. A) retilínea; B) bifurcada; C) afunilada; D) espongiforme. Fonte: Piló et al., 2015.....	37
Figura 14: Perfil síntese de uma caverna ferrífera com as principais feições morfológicas. Fonte: Piló et al., 2015.	38
Figura 15: Conjunto de espeleotemas raros na caverna S11B_0094. Foto: Allan Calux.	40
Figura 16: SISTEMA AFÓTICO: A- Cavidade sem influência de luz e que possui camada de Arenito. B- Início da precipitação do gel sem interferência de microrganismos, com desenvolvimento do Coraloide Acicular puro de hábito acicular. C- Estágio final de Coraloídes puros que além de hábito acicular, ocorre também espículas de hábito radial caracterizando o Coraloide Radial (SILVA et al. 2015)....	41
Figura 17: Perfil longitudinal da caverna N4WS_0067.	48
Figura 18: (A, B, C e D) Piso com evidentes processos de corrosão e erosão: canais de escoamento concentrado, sulcos e buracos semi-circulares resultado do gotejamento; pináculos residuais também foram observados, além de caneluras (B).	48
Figura 19: Localização das seis amostras de espeleotemas.	49
Figura 20: A) Conjunto de estalactites; B) Estalactites e cortinas na parede “W” do segundo salão; C) Coluna; D) Estalactites seguindo à fratura; E: Sobreposição de “parafusos” e “dedos” sobre coluna.....	50
Figura 21: A) Piso rochoso, recobertos por matacões e canais rochosas de escoamento; B) Piso corroído, com buracos de corrosão e erosão semicirculares resultado do gotejamento e efeito “splash”. Caneluras nas paredes e pináculos residuais no piso.	54

Figura 22: Perfil longitudinal da caverna N4WS_0072 indicando a concordância da inclinação do piso com a vertente.	54
Figura 23: Localização das amostras de espeleotemas coletados.	55
Figura 24: A) Local onde se concentra o mais importante conjunto de espeleotemas; B) Estalactite isolada no teto.	55
Figura 25: Caneluras nas paredes indicando processos de corrosão na parede SSE.	58
Figura 26: Perfil da caverna N3_0023 indicando concordância da inclinação do piso com vertentes e residuais de correntes erosivos ocorridos.	58
Figura 27: (A) Piso com buracos, sucros e pináculos residuais; (B) Piso coberto por depósitos de guano; nas paredes canais e caneluras e; C) Paleopisos em diferentes níveis.	59
Figura 28: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.	60
Figura 29: A) Espeleotemas no teto da caverna; B) caneluras nas paredes C e D) Piso ruiforme com buracos, furos e pequenos canais.	63
Figura 30: Perfil longitudinal da caverna N3_0074 indicando a concordância do piso com a vertente.	64
Figura 31: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.	64
Figura 32: A) Estalactite; B) Crosta acinzentada. (FCCM, 2009).	65
Figura 33: Perfil da caverna S11D_0083 indicando lâmina d'água e piso relativamente plano, sub-horizontal.	68
Figura 34: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.	68
Figura 35: A) Conjunto de estalactites do salão NW; B) Estalactite recoberta por crostas.	69
Figura 36: Lâmina d'água nas proximidades da entrada que dá passagem para outros setores da caverna.	72
Figura 37: A) Bolsões no teto; B) Pequenas cúpulas.	73
Figura 38: A) Canal rochoso de escoamento concentrado; B) Espesso depósito de guano; D) Surgência no final do conduto; (C) Piso recoberto por guano e feições morfológicas associadas a processos de corrosão.	74
Figura 39: Perfil da caverna S11C_0041 indicando a concordância do piso com a vertente.	74
Figura 40: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.	74
Figura 41: A) Conjunto de espeleotemas associados à fratura no teto; B) Concentrações de estalactites; C) Estalactites recobertas de crostas e "parafusos"; D) Coluna e estalactites próximos a trinca no teto.	78
Figura 42: A) Guano recobrindo o piso; B) poças com guano; C) piso com bolsas de corrosão ocupadas por com água e guano; D) lago com água e guano.	79
Figura 43: A) Escorrimentos e estalactites nas paredes; B) Estalactite com cristalização concêntrica.	80
Figura 44: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.	81
Figura 45: Parâmetros espeleométricos das cavernas estudadas.	85

Figura 46: Desnível das cavernas estudadas.....	86
Figura 47: Classificação planimétrica e morfológica das cavernas estudadas.....	87
Figura 48: A/B) Crosta laranja no contato piso com guano e parede na caverna N3_0023; C) Lago reliquiar na caverna N4WS_0067 que teve a parede erodida.D) Variação do nível d'água, sazonal, marcado por crostas brancas nas paredes da caverna S11C-0041	89
Figura 49: Frequência de minerais divididos por classe.....	94
Figura 50: Média dos principais elementos encontrados nas amostras.	95
Figura 51 Frequência dos óxidos-hidróxidos.....	96
Figura 52 Frequência dos fosfatos nas amostras.....	97
Figura 53 Frequência dos silicatos nas amostras	100
Figura 54 Frequência dos sulfatos nas amostras.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Amostra selecionada.....	23
Tabela 2: Composição química do guano de morcego encontrado na caverna Kasarawe, Tanzânia. Fonte: Mlyá & Sagamiko (2008)	44
Tabela 3: Resultado da DRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0067	51
Tabela 4: Resultado da FRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0067	53
Tabela 5: Resultado da DRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0072	56
Tabela 6 Resultado da FRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0072	57
Tabela 7: Resultado da DRX na caverna N3_0023.....	60
Tabela 8: Resultado da FRX na caverna N3_0023	62
Tabela 9: Resultado da DRX na caverna N3_0074.....	65
Tabela 10: Resultado da FRX na caverna N3_0074	66
Tabela 11: Resultado da DRX na caverna S11D_0083	69
Tabela 12: Resultado da FRX na caverna S11D_0083.....	71
Tabela 13: Resultado da DRX na caverna S11C_0041	75
Tabela 14 Resultado da FRX na caverna S11C_0041.....	77
Tabela 15: Resultado da DRX na caverna S11B_0094	82
Tabela 16: Resultado da FRX na caverna S11B_0094.....	84
Tabela 17: Feições morfológicas observadas	87
Tabela 18: Classificação das poças e lagoas presentes nas cavernas estudadas. ..	88
Tabela 19: Feições hidrológicas observadas	88
Tabela 20: Dados de pH e condutividade elétrica (μS).	90
Tabela 21: Análise da ocorrência do guano nas cavernas amostradas	91
Tabela 22: minerais fosfáticos registrados em cavernas do mundo x minerais encontrados no presente estudo.	93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVOS GERAIS	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 ÁREA DE ESTUDO	18
3.1 LOCALIZAÇÃO DAS CAVERNAS.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	23
4.2 SELEÇÃO DA AMOSTRA	23
4.3 ELABORAÇÃO DE FICHA DE CAMPO	24
4.4 LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO	24
4.5 CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA	27
4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE GUANO	28
4.7 CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DA ÁGUA DAS CAVERNAS.....	28
4.8 CARACTERIZAÇÃO E COLETA DE ESPELEOTEMAS	28
4.9 ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS	28
5 REFERENCIAL TEÓRICO DA ESPELEOLOGIA	30
5.2 MORFORLOGIA DAS CAVERNAS.....	34
5.3 ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS FERRÍFERAS	38
5.4 ORIGEM DOS FOSFATOS NOS ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS FERRÍFERAS	43
6 RESULTADOS	47
6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVERNAS ESTUDADAS	47
6.2.1 Caverna N4WS_0067	47
6.2.1.1 <i>Espeleotemas</i>	49
6.2.1.2 <i>Resultado das DRX</i>	50
6.2.1.3 <i>Resultado das FRX</i>	52
6.2.2 Caverna N4WS_0072	53
6.2.2.1 <i>Espeleotemas</i>	55
6.2.2.2 <i>Resultado da DRX</i>	56

6.2.2.3 Resultado da FRX	57
6.2.3 Caverna N3_0023.....	57
6.2.3.1 Espeleotemas.....	59
6.2.3.2 Resultado da DRX.....	60
6.2.3.3 Resultado da FRX	62
6.2.4 Caverna N3_0074.....	62
6.2.4.1 Espeleotemas.....	64
6.2.4.2 Resultado das DRX	65
6.2.4.2 Resultado da FRX	66
6.2.5 Caverna S11D_0083	67
6.2.5.1 Espeleotemas.....	68
6.2.5.2 Resultado das DRX	69
6.2.5.3 Resultado da FRX	71
6.2.6 Caverna S11C_0041	71
6.2.6.1 Espeleotemas.....	74
6.2.6.2 Resultado das DRX.....	75
6.2.6.3 Resultado da FRX	77
6.2.7 Caverna S11B_0094	77
6.2.7.1 Espeleotemas.....	80
6.2.7.2 Resultado das DRX.....	81
6.2.7.2 Resultado da FRX	83
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	84
7.1 OS LITOTIPOS DAS CAVERNAS.....	84
7.3 O PADRÃO PLANIMÉTRICO E MORFOLÓGICO	86
7.4 AS FEIÇÕES MORFOLÓGICAS.....	87
7.5 FEIÇÕES HIDROLOGICAS.....	88
7.6 SEDIMENTOS ORGÂNICOS	91
7.7 MINERALOGIA DOS ESPELEOTEMAS	92
7.7.1 Óxidos-hidróxidos.....	95
7.7.2 Fosfatos	97
7.7.3 Silicatos.....	99
7.7.4 Sulfatos.....	100

8 CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

Apesar de constituírem objeto de estudo sistemático no Brasil muito recentemente, as feições cársticas desenvolvidas em rochas ferríferas são reportadas na literatura internacional desde o início do século passado (GAUTIER, 1902; JUTSON, 1914; DIXEY, 1920; DE CHÉLETAT, 1938). A maior parte das referências sobre o assunto está associada ao continente africano, embora existam descrições de feições deste tipo em várias partes do mundo (AULER & PILÓ, 2005). As primeiras referências às cavernas ferríferas em Carajás são do início da década de 1970. Destaca-se o trabalho de Tolbert et al. (1971) sobre as jazidas de minério de ferro recém-descobertas. O referido autor fez referência ao manto de canga que continha grandes cavernas. Já na década de 1980, os primeiros estudos sobre as cavernas de Carajás foram conduzidos por Pinheiro et al. (1988) e Pinheiro & Maurity (1988).

Em seu primeiro relatório sobre as cavernas de Carajás, Pinheiro et al. (1985) detalharam quatro cavernas, no Platô de N1, na Serra Norte, além de discorrerem sobre as feições encontradas e sua possível gênese. Este trabalho foi detalhado em Pinheiro & Maurity (1988), onde a interpretação espeleogenética foi aprimorada. Maurity & Kotschoubey (1995) posteriormente produziram um minucioso estudo não só sobre a gênese das cavidades, como também sobre a mineralogia de alguns espeleotemas. Somente em 2011 novos estudos foram realizados por Piló & Auler (2011) sobre a tipologia e mineralogia de espeleotemas em cavernas ferríferas, localizadas em diferentes serras de Carajás.

Os autores Maurity & Kotschoubey (1995) e Piló & Auler (2011) têm relatado algumas características comuns em relação aos espeleotemas e as morfologias (planimetria/ seções e feições morfológicas) registradas nas cavernas de ferro, características aparentemente recorrentes como dimensões reduzidas, único salão, aspecto esponjiforme, entre outras.

No entanto, há uma parcela destas cavernas onde se desenvolveram espeleotemas diferenciados. São cavernas com espeleotemas considerados raros, no contexto das cavernas ferríferas, incluindo estalagmites, colunas e estalactites de fosfatos, além de excêntricos coraloides fosfáticos Maurity & Kotschoubey (1995) e Piló & Auler (2011).

Essas cavernas, onde se desenvolveram esses espeleotemas raros, também são ambientes onde ocorrem morfologias raras, destacando canais de drenagem no piso da caverna, feições semelhantes a kamenitzas (bolsas de dissolução) e caneluras. A presença de expressivos depósitos de guano de morcegos também foi registrada nessas cavernas. É importante salientar que pouco foi discutido sobre a origem dessas feições morfológicas e desses espeleotemas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar estudos geoespeleológicos e cartográficos em um conjunto de cavernas com ocorrências de espeleotemas raros e feições morfológicas peculiares, visando uma melhor compreensão da origem e evolução desses depósitos químicos e dessas morfologias.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente pretende-se:

- Descrever e analisar a morfologia (planimetria/ seções e feições) das cavernas amostradas;
- Descrever e analisar espeleotemas raros, incluindo sua mineralogia e química global;
- Descrever e analisar a química das rochas encaixantes, dos depósitos orgânicos (guano) e de parâmetros da água do interior das cavernas.

3 ÁREA DE ESTUDO

Conhecida como Província Mineral de Carajás (PMC) ou simplesmente Serra dos Carajás, a área de estudo situa-se na Floresta Nacional de Carajás, incluindo as serras Norte e Sul (Figura 1), na porção oriental do Cráton Amazônico, no sudeste do Estado do Pará (ALMEIDA, 1967; SANTOS, 2003; VASQUEZROSA-COSTA, 2008). A região é limitada a leste pelos rios Tocantins e Araguaia, a oeste pelo rio Xingú, a norte pela Serra do Bacajá, e a sul pela Serra dos Gradaús (DOCEGEO, 1988) e é considerada uma das principais províncias minerais do mundo (LOBATO et al., 2005).

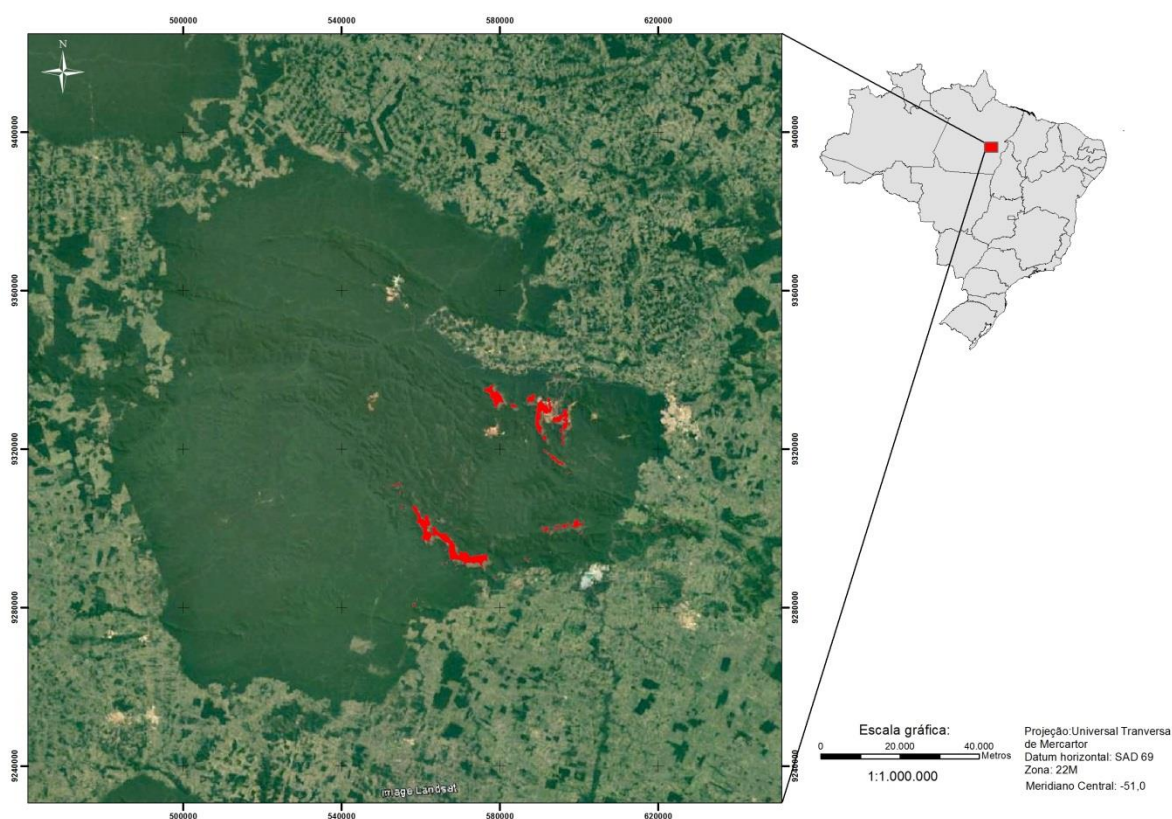


Figura 1: Localização da Serra dos Carajás (em vermelho). Fonte: Google Earth

A Serra de Carajás representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico. A região foi formada e estabilizada tectonicamente no Arqueano, não sendo afetada pelas orogêneses do Ciclo Transamazônico (TASSINARI & MACAMBIRA, 2004). É interpretada como uma bacia neoarqueana,

sobreposta a um embasamento mesoarqueano, contendo rochas de complexos ígneos e metamórficos (LOBATO et al., 2005; FIGUEIREDO-SILVA, 2009).

As rochas mais antigas e de grau metamórfico mais alto pertencem ao Complexo Pium e estão localizados na porção sul da província mineral de Carajás. Tem idade de $2,859 \pm 9$ Ga (PIDGEON et al., 2000) e são descritas como granulitos félsicos e máficos.

O Complexo Xingu, considerado por grande parte dos autores como o embasamento (LOBATO et al., 2005), engloba rochas de composição granodiorítica e tonalítica de fácies anfibolito. Apresenta idades de $2,859 \pm 2$ Ga e $2,851 \pm 4$ Ga (MACHADO et al., 1991).

Na parte sul da região encontra-se o *greenstone belt* Rio Maria, com idade entre 3,2 e 2,9 Ga (BIZZI et al., 2001), que contém importantes mineralizações auríferas. A unidade é composta por rochas vulcânicas máficas e ultramáficas intercaladas com rochas sedimentares na base, gradando para rochas vulcânicas intermediárias a félsicas associadas com folhelho, grauvaca e formação ferrífera bandada no topo.

A Serra dos Carajás, propriamente dita, é constituída por dois conjuntos rochosos maiores, sendo um de origem metavulcanossedimentar e outro metassedimentar (LOBATO et al., 2005) que, junto com outras sequências metavulcanossedimentares compõem o Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988) que, por sua vez, subdivide-se nos grupos Igarapé Bahia, Aquiri e Grão Pará a sul, e grupos Igarapé Salobo e Igarapé Pojuca, a norte. No entanto, vale salientar que a PMC é definida por sequências vulcanossedimentares que experimentaram os efeitos de dobramento regional, falhamento transcorrente, metamorfismo de contato e/ou metassomatismo ao redor de domos graníticos, além de alteração hidrotermal relacionada a diversos eventos de mineralização. A soma desses fatores resultou em um Supergrupo Itacaiúnas mal dividido (LOBATO et al., 2005; ROSIÉRE et al., 2005).

Do ponto de vista geomorfológico, segundo Boaventura (1974), a Serra dos Carajás está inserida em duas Unidades Morfoestruturais e Morfoclimáticas: i) o Planalto Dissecado do Sul do Pará; e ii) Depressão Periférica do Sul do Pará. O primeiro é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e um conjunto de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados. O segundo é

caracterizado por extensa unidade de relevo rebaixado, com colinas de topo aplainado e cobertura sedimentar inconsolidada.

Além das formas residuais de relevo planáltico com espessas coberturas pedológicas, ainda se incluem neste compartimento os relevos cimeiros sustentados por formação ferrífera ou cangas (Figura 2), cuja identificação é facilmente percebida dada à especificidade da fisionomia savânica da vegetação que estes relevos comportam (MARTINS et al., 2012).



Figura 2: Planalto residual de Carajás; platô de Serra Sul recoberto pela savana. Foto: João Rosa

Carajás está inserida na bacia do rio Tocantins, que de acordo com Mérona et al. (2010), integra paisagens distintas, incluindo os cerrados estacionalmente secos do planalto Central do Brasil, os ambientes quentes e úmidos da Floresta Amazônica e uma zona de transição entre ambos, denominada de ambientes Pré-Amazônicos. Esta bacia é de grande relevância para a formação do estuário amazônico, pois deságua, nas proximidades da Ilha do Marajó, mais de 10% da descarga do Rio Amazonas no oceano Atlântico (GOULDING, et al., 2003). Embora não esteja ligada

diretamente ao rio Amazonas, a bacia do rio Tocantins compartilha com esta parte importante da diversidade e riqueza de espécies de peixes (BARTHEM & GOULDING, 1997) em função das conexões com o estuário amazônico já mencionado (ICMBio, 2016).

Souza-Filho et al. 2016 analisou um conjunto de dados multivariáveis que envolveram imagens de satélite - Landsat de 1973,1984, 1994, 2004 e 2013 e uma série de 40 anos de descarga do rio Itacaiúnas, além da temperatura do ar e umidade relativa para a mesma área e o mesmo período. Utilizando técnicas de processamento de imagem Landsat em conjunto com imagens de análise do objeto geográfico e abordagem de classificação multi-resolução constatou que o desmatamento atingiu 52% da área da bacia, e que essa mudança na cobertura é aparentemente responsável por um aumento de 1.70 C na temperatura, redução de quase 10% umidade relativa do ar e aumento de 85% no fluxo de água observada em 2013 em comparação com a linha de base de 1973.

3.1 LOCALIZAÇÃO DAS CAVERNAS

As sete cavernas selecionadas estão localizadas nas duas principais serras da região de Carajás, ou seja, Serra Norte e Serra Sul (Figura 3). Na Serra Norte foram selecionadas quatro cavernas, sendo duas no platô de N3 (N3_0023 e N3_0074) e duas no platô de N4WS (N4WS_0067 e N4WS_0072). Na Serra Sul foram selecionadas três cavernas, sendo uma em S11D (S11D_0083), uma em S11C (S11C_0041) e uma em S11B (S11B_0094).

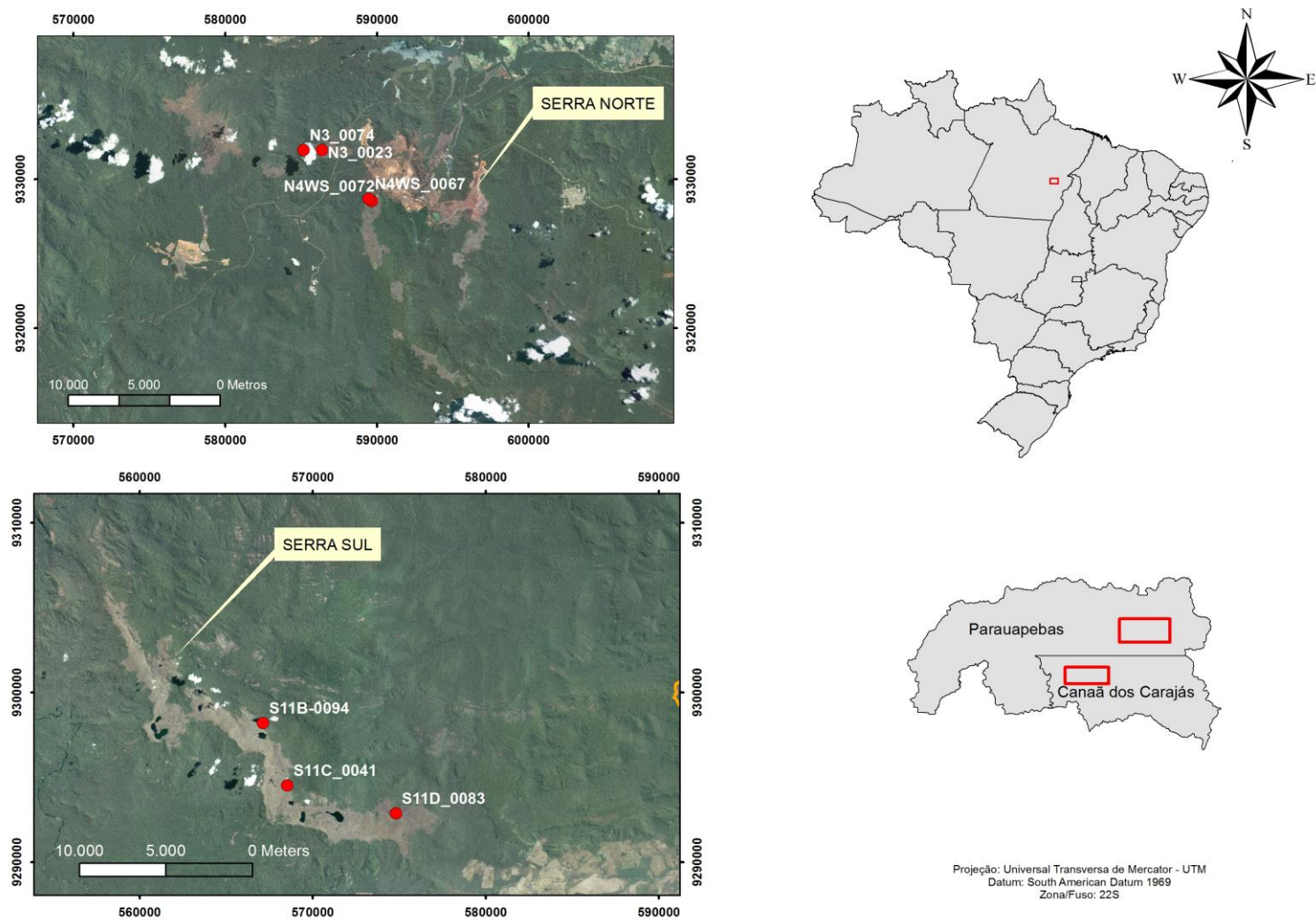


Figura 3: Localização das cavernas amostradas nas Serras Sul e Norte.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram seguidos os seguintes procedimentos:

4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A revisão e o levantamento bibliográfico buscaram, além de trabalhos acadêmicos, relatórios técnicos e estudos relacionados a processos de licenciamento sobre o tema abordado nesta pesquisa. Também foram levantados todos os dados gerados sobre as cavernas selecionadas.

4.2 SELEÇÃO DA AMOSTRA

Foram selecionadas sete cavernas que continham um conjunto de atributos, neste caso, espeleotemas fosfáticos considerados raros na região de Carajás. A premissa foi selecionar toda caverna em rocha ferrífera que houvesse ocorrência de estalactites e coraloídes raros, além de cavernas com aspectos morfológicos peculiares como expressivas bolsas de corrosão no piso, caneluras nas paredes e outras feições morfológicas raras na região. A Tabela 1 apresenta as cavernas selecionadas.

Tabela 1 Amostra selecionada.

	Cavidade	UF	Município	Local	Zona UTM	DATUM	E	N	Elevação
01	N4WS_0072	PA	Parauapebas	N4WS	22S	SAD-69	589675	9328540	616
02	N4WS_0067	PA	Parauapebas	N4WS	22S	SAD-69	589452	9328690	584
03	N3_0023	PA	Parauapebas	N3	22S	SAD-69	586379	9331983	607
04	N3_0074	PA	Parauapebas	N3	22S	SAD-69	585168	9331968	524
05	S11D_0083	PA	Canaã dos Carajás	S11D	22S	SAD-69	574802	9292886	745
06	S11C_0041	PA	Canaã dos Carajás	S11C	22S	SAD-69	568528	9294526	659
07	S11B-0094	PA	Canaã dos Carajás	S11B	22S	SAD-69	567130	9298209	723

4.3 ELABORAÇÃO DE FICHA DE CAMPO

Elaboração de ficha de campo (apêndice 1) para coleta sistemática dos dados com campos objetivos e descritivos, testada em duas cavernas entre 16 e 18 de junho de 2015.

4.4 LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO

Das sete cavernas selecionadas somente uma (S11B_0094) não havia sido alvo de topografia de detalhe. Este levantamento topográfico foi realizado de modo a se obter o grau de precisão 5D, com base no sistema *British Cave Research Association* – BCRA. Foram utilizados na topografia das cavernas os seguintes instrumentos: Bússola e clinômetro de marca Suunto, modelos KB-14/360R e PM-5/360PC, respectivamente; trena laser Leica modelo Disto A3; prancheta, papel milimetrado, transferidor, lápis e borracha.

A **topografia** seguiu o método de bases fixas e os cálculos espeleométricos foram realizados por projeção horizontal seguindo o método da descontinuidade (CHABERT & WATSON, 1981; HERNÁNDEZ, 1997; RUBBIOLI & MOURA, 2005).

Para realizar a **cartografia** utilizou-se o *software OnStation*, programa que cria linhas de visada a partir dos dados levantados em campo, permitindo ajustes, correções da variação magnética; permite ainda a visualização da linha de trena na forma tridimensional e *software AutoCAD* versão 2012, com plataforma georreferenciadas. No *AutoCAD* foram finalizados os itens da planta baixa como contorno de paredes, curvas de nível, linha d'água, entre outros. A declinação magnética foi obtida no site do Observatório Nacional (www.on.br).

Para o cálculo da **projeção horizontal** adotou-se o princípio da descontinuidade (vide RUBBIOLI & MOURA, 2005), que desconsidera a largura dos condutos no cálculo final. Desse modo, a soma do comprimento de um conduto é feita ao longo do seu eixo central. No cruzamento entre dois condutos a medição é interrompida de modo a não incluir o comprimento lateral do conduto transversal (Figura 4).

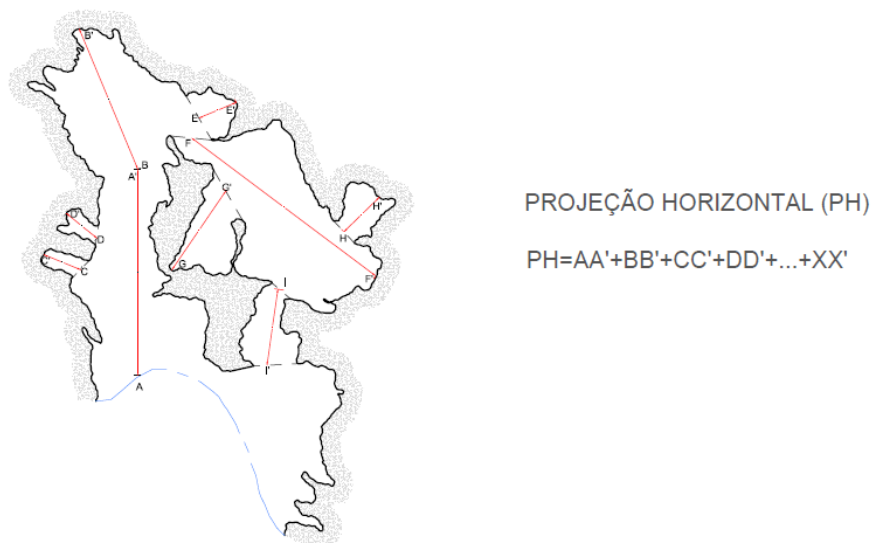


Figura 4: Método para calcular a projeção horizontal.

O **desnível** é o resultado da diferença altimétrica das bases topográficas (Figura 5). Essa diferença é obtida através do piso mais elevado e o mais rebaixado da caverna. Em casos de patamar, paleopiso ou nível superior sua altura é considerada no cálculo do desnível.

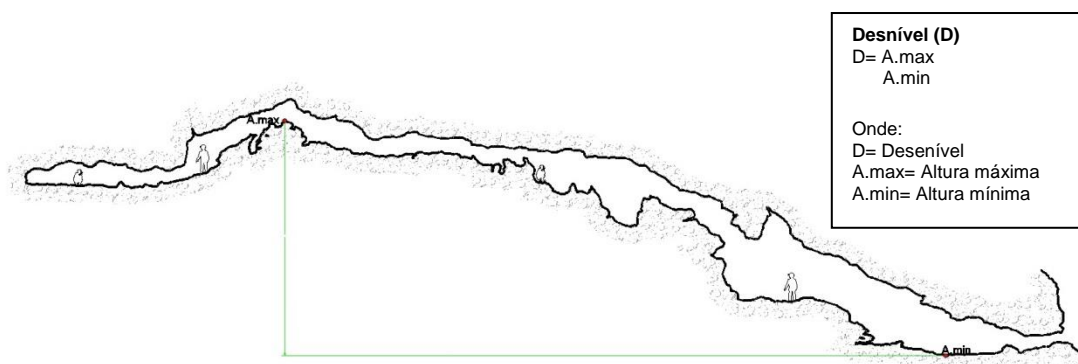


Figura 5: Método para calcular o desnível

O cálculo da **área** foi obtido através do *software AutoCAD* a partir da planta baixa das cavernas. Em caso de ocorrência de pilares, as suas áreas foram calculadas individualmente e subtraídas do valor total medido. A área total é o resultado da somatória da área da planta baixa de todos os níveis de piso, descontadas as áreas dos pilares (Figura 6).

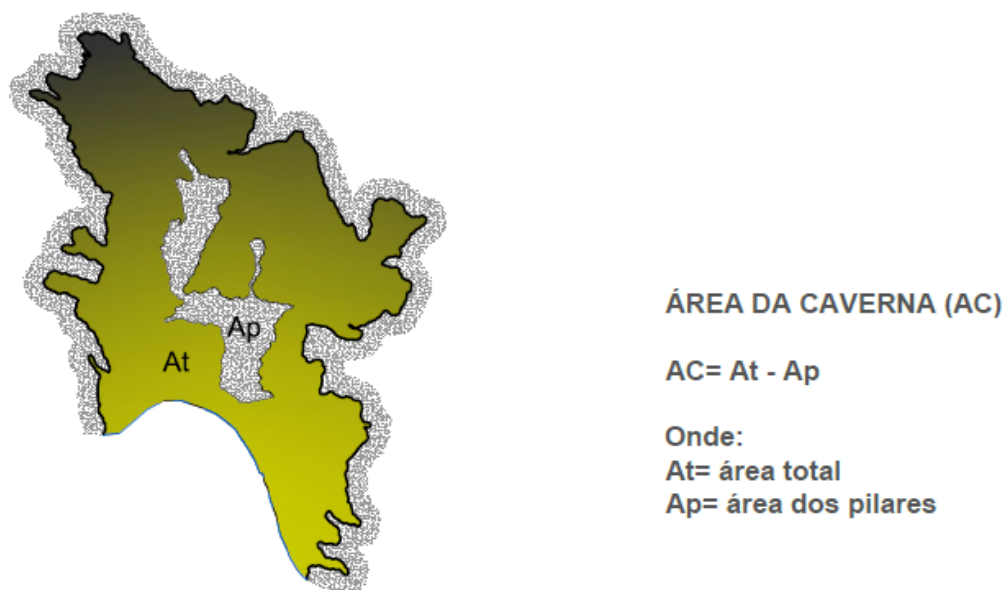


Figura 6: Método para calcular a área.

O **volume** é o produto da área total da cavidade pela altura média total de seus condutos. Para a obtenção desta última é necessária a realização de perfis em pontos representativos da cavidade. No entanto, os condutos possuem perfis irregulares, com diferentes alturas de teto. Para que se consiga um valor mais próximo da realidade são feitos perfis longitudinais sempre no eixo central do conduto, além de vários perfis transversais. O passo seguinte é a obtenção da altura média de cada perfil, pela divisão de sua área pelo seu comprimento. A altura média total é a soma da altura de todos os perfis dividida pelo total de perfis considerados. Desse modo, quanto mais perfis forem elaborados, maior será a precisão no cálculo do volume (Figura 7).

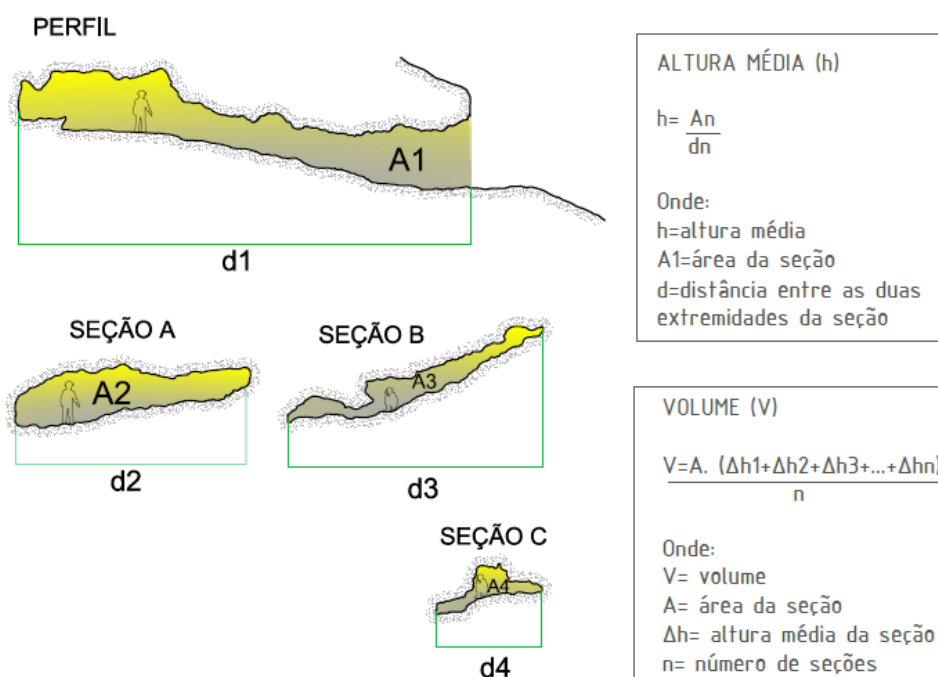


Figura 7: Método para calcular o volume.

4.5 CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA

A classificação do padrão planimétrico foi realizada com base no proposto por Palmer (1991; 2003) (Figura 8), comparando os sete mapas topográficos das cavernas estudadas com padrões pré-definidos (retilíneo, esponjiforme, anastomosado, reticulado, labiríntico e salão único).

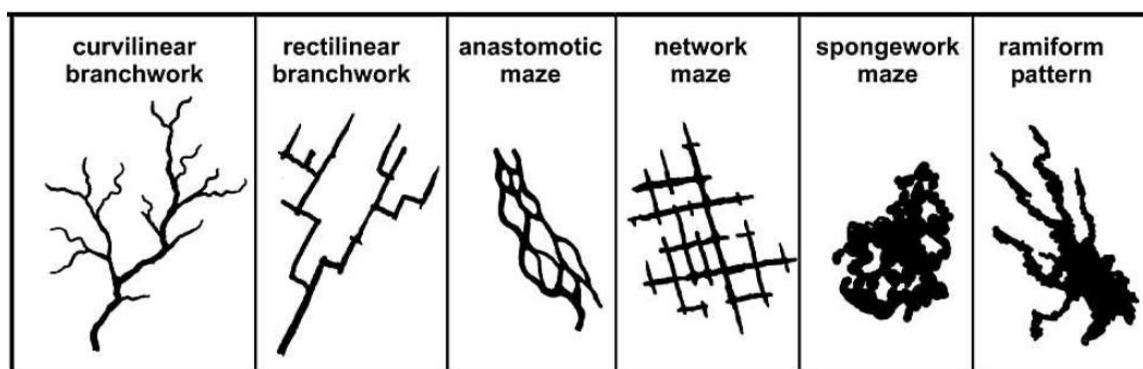


Figura 8: Classificação planimétrica proposta por Palmer (1991; 2003).

As feições morfológicas observadas no piso e nas paredes das cavernas amostradas também foram identificadas e analisadas.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE GUANO

A caracterização do guano levou em consideração os seguintes parâmetros: guano seco, guano úmido, guano na drenagem, espessura estimada do depósito e se havia guano nas paredes.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DA ÁGUA DAS CAVERNAS

Para analisar os parâmetros de pH e condutividade elétrica dos corpos hídricos existentes nas cavernas foi utilizado o equipamento portátil HANNA COMBO HI 98129.

4.8 CARACTERIZAÇÃO E COLETA DE ESPELEOTEMAS

Em cada caverna foram definidos no mínimo três pontos de coletas, podendo ser na parede, no teto e/ou no piso. Para caracterizar os espeleotemas realizou-se levantamento fotográfico de cada amostra coletada. A coleta foi autorizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, através da Autorização para atividades com finalidade científica número 50212-1.

Ao todo foram coletadas 36 amostras entre os dias 21 de setembro e 02 de outubro de 2015, em pontos discretos dos espeleotemas ou dos litotipos, visando não impactar visualmente o local. Após as coletadas, as amostras foram identificadas, acondicionados em sacos plásticos e caixa hermética com divisórias.

Os materiais e equipamentos utilizados foram martelo de mão, espátula, formão, escala, saco plástico de 1kg, caixa plástica hermética para transporte, papel vegetal, etiqueta, máquina fotográfica Nikon D5000 e lente Nikon 18-105mm/3.5.

4.9 ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

As amostras foram analisadas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Caracterização Tecnológica. As amostras para análises químicas foram prensadas na calibração STD-1 (Standardless), relativa à análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, em espectrômetro de fluorescência

de raios X. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.020°C por 2h. Os valores expressos foram normalizados a 100%.

A Difração de raios-X utilizou o método a pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X com detector sensível a posição.

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - *International Centre for Diffraction Data* e ICSD - *Inorganic Crystal Structure Database*.

5 REFERENCIAL TEÓRICO DA ESPELEOLOGIA

5.1. ASPECTOS GENÉTICOS DAS CAVERNAS FERRUGINOSAS

Cavernas em meio laterítico (formações ferríferas, cangas e ferricretes) têm sido reportadas na literatura geológica desde o século XIX, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (PISSIS, 1842; HENWOOD, 1871). Mas foi em meados do século XX, diante da atuação dos geólogos do *United States Geological Survey* – USGS no Quadrilátero Ferrífero, que surgiram os estudos mais específicos sobre cavernas ferríferas, a exemplo de GUILD (1957). Merece destaque os estudos do geólogo americano George Simmons, que elaborou as primeiras ideias sobre a gênese dessas cavernas, além de revelar a mineralogia de espeleotemas (SIMMONS, 1963, 1964).

O trabalho clássico de Simmons (1963) contemplou diversas cavidades na serra do Batateiro, na serra do Tamanduá, no morro da Queimada e na serra do Curral. Nesta publicação George Simmons apresenta, ainda, o mapa de uma caverna na Serra do Tamanduá e uma breve compilação de cavidades observadas por colegas geólogos do USGS, que reportaram cavidades no distrito de Itabira. Além da sua descrição, Simmons, elaborou um interessante modelo genético e detalha a mineralogia de um então raro fosfato nas grutas, a leucofosfita.

Segundo Simmons (1963), as cavernas de erosão encontram-se normalmente dispostas lateralmente, devido aos dobramentos, estando localizadas em posição topográfica mais baixa. Estas cavidades se formariam imediatamente abaixo do manto de canga que sustentam as bordas dos vales. De maneira geral, apresentam uma única galeria, mais larga que extensa, com entradas ligeiramente estreitas, sendo a extensão limitada à capacidade de suporte da couraça de canga subjacente.

As cavernas de dissolução, por sua vez, são maiores que as cavernas de erosão, sendo frequentemente compostas por vários compartimentos internos. Sua forma e dimensões são provavelmente controladas pelo teor de minerais solúveis e pela disposição do acamamento do itabirito. O piso destas cavidades está diretamente relacionado com a entrada, podendo ser coberto por sedimentos, no caso de uma única entrada, ou desnudo, em circunstâncias onde uma drenagem flui por uma das

entradas e sai pela outra, carreando o material depositado. As paredes destas cavidades são relativamente lisas, tal qual o piso. O teto, em geral, é representado por canga em inconformidade angular com o itabirito subjacente.

Na Amazônia, particularmente na Serra dos Carajás, no Pará, as primeiras referências às cavernas ferríferas são do início da década de 1970, através dos trabalhos de Tolbert et al. (1971) sobre as jazidas de minério de ferro recém-descobertas que, segundo o autor, continham grandes cavernas sob o manto de canga. Já na década de 1980, os estudos foram conduzidos por Pinheiro et al. (1988) e Pinheiro & Maurity (1988). Segundo os autores, a formação dessas cavidades está associada à drenagem de águas superficiais através de fraturas, resultando na lixiviação de minério macio, filitos e xistos.

Os estudos espeleológicos na Serra dos Carajás tiveram um grande avanço a partir dos trabalhos de pesquisadores ligados ao Grupo Espeleológico Paraense. Pinheiro et al. (1985) apresentam resultados do estudo de quatro cavernas de Serra Norte, a Gruta dos Anões, Gruta do N1, Gruta do Gavião e Gruta da Onça. Além do levantamento topográfico das cavidades, realizaram levantamentos de intensidade de luz penetrante, temperatura, umidade, coleta de espécimes vegetais nas zonas de entrada, coleta micológica e análise dos sedimentos do piso. Foram feitas descrições detalhadas da morfologia das cavernas e apresentadas hipóteses espeleogenéticas que resultaram em um modelo genético geral para as cavernas da Serra dos Carajás (Figura 9).

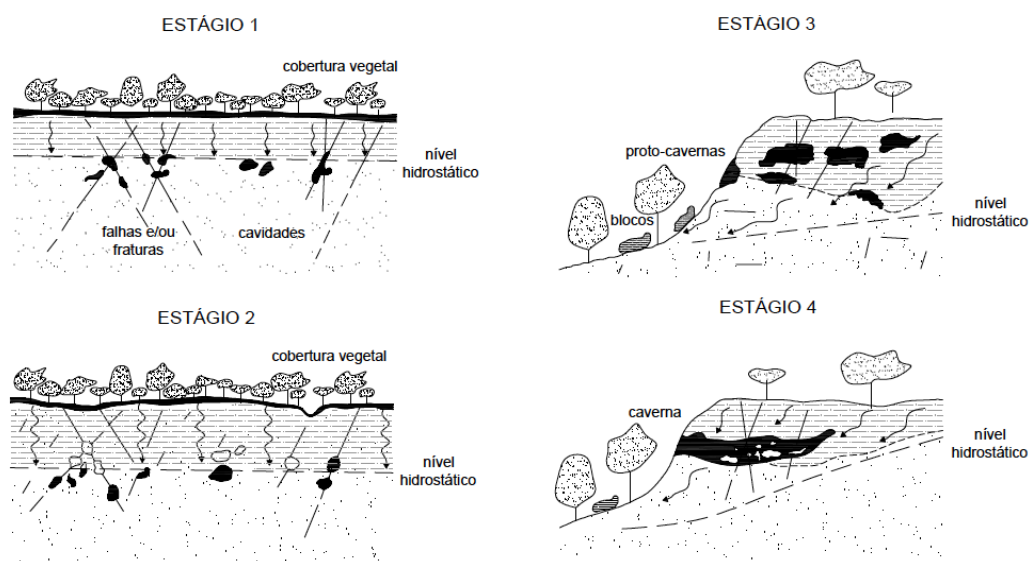


Figura 9: Quadro espeleogenético esquemático para as cavernas da Serra dos Carajás (PA). Pinheiro et al. (1985)

O trabalho pioneiro de Pinheiro et al. (1985) foi detalhado em Pinheiro & Maurity (1988) onde a interpretação espeleogenética foi aprimorada (Figura 10). Neste trabalho, os autores afirmam que as cavernas da Serra dos Carajás estão inseridas nas porções superficiais do perfil de laterização, logo abaixo da carapaça ferruginosa.

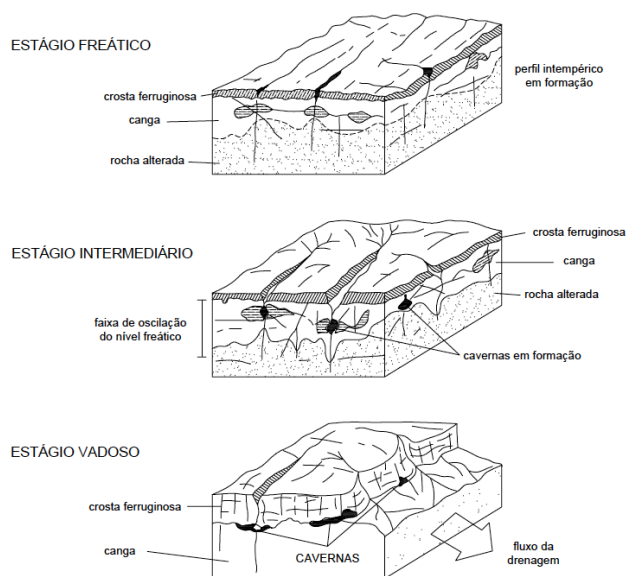


Figura 10: Esquema evolutivo para as cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás. Fonte: Pinheiro & Maurity (1988)

A busca sistemática de cavernas na região de Carajás se iniciou com o convênio entre Vale e o Grupo de Espeleologia de Marabá – GEM através da Fundação Casa de Cultura de Marabá – FCCM. O objetivo principal era levantar o potencial espeleológico nas áreas de atuação da empresa naquela região. A partir daí extensos e importantes levantamentos espeleológicos foram realizados nos platôs de Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste, entre outros, culminando no cadastramento de mais de 1.000 cavernas.

Atzingen & Crescêncio (1999) com o apoio do Grupo Espeleológico de Marabá (GEM), apresentaram os resultados de um trabalho de prospecção espeleológica realizada na região de Serra Leste, também conhecida como Serra Pelada. Nesta pesquisa foram identificadas e descritas 27 cavernas hospedadas na formação ferrífera.

Em trabalho de síntese, Atzingen et al. (2009) apresentaram uma lista de cavernas identificadas em cinco anos de trabalhos contendo informações espeleométricas, geoespeleológicas, bioespeleológicas e arqueológicas de 432 cavernas na Serra Norte e Serra Sul, região da Serra dos Carajás.

Dutra (2013), em síntese sobre os processos de gênese de cavidades em litologias de ferro acrescenta algumas hipóteses sobre os processos genéticos para formação das cavernas: processos de erosão, lixiviação, dissolução e biogênese. Na erosão têm-se processos específicos tais como erosão remontante, erosão por cachoeira, erosão nas margens de drenagens, erosão nas cabeceiras de drenagens, erosão em bordas de lagoas, ampliação devido a desabamos e depósito de tálus.

No sopé do planalto residual, por volta de 350 m de altitude, merecem atenção leques coluvionares cimentados, representados por brechas ferruginosas formadas por clastos de rochas mais diversificadas, incluindo rochas vulcânicas, metarenitos e quartzo, denominadas de ferricrete. São formas terminais das serras, típicas áreas de preenchimento sedimentar, onde se desenvolvem cavernas associadas com o escoamento subsuperficial (PILÓ et al., 2014).

Auler et al. (2014) e Piló et. al. (2015) discutiram a geração de vazios em profundidade na formação ferrífera, que envolveria tanto ação biológica quanto

química. Segundo os autores, furos de sondagens geológicas registraram com frequência a ocorrência de vazios isolados em diversas profundidades (abaixo da zona do intemperismo, na ordem de até algumas centenas de metros) do substrato rochoso. Diferentemente das cavernas de padrão esponjiforme definida por Palmer (2009), as cavernas profundas na formação ferrífera não apresentam conexões entre os poros na escala do substrato rochoso, constituindo macroporos isolados, muito irregulares, formados em ambiente de fluxo lento. As cavernas na formação ferrífera não constituem rotas de drenagem subterrânea, como nas cavidades carbonáticas.

Esses processos espeleogenéticos apresentam semelhanças com as cavernas hipogênicas, no sentido em que a porosidade da rocha inicial é gerada em profundidade, sem nenhuma influência de processos de superfície. Posteriormente, em decorrência do recuo das vertentes, milhares desses macroporos existentes próximos à superfície, se conectaram aos terrenos ferruginosos, ampliando as conexões com a dinâmica hidrológica das vertentes (AULER et al. 2014). Várias entradas de pequenas cavernas foram abertas neste processo evolutivo. A sedimentação foi intensificada com os movimentos de massa (abatimentos), gerando depósitos cascalhentos de origem autogênica (AULER et al.2014; PILÓ et al. 2015).

5.2 MORFORLOGIA DAS CAVERNAS

Palmer (1991) foi o primeiro a apresentar uma síntese sobre a origem das morfologias planimétricas das cavernas em rochas carbonáticas (Figura 11). Seus estudos objetivaram inter-relacionar os tipos de recarga hídrica, as estruturas da rocha (porosidade) e as direções de escoamento da água subterrânea. Nas cavernas carbonáticas, as diversas formas de recarga da água, a estrutura da rocha, a direção do escoamento da água subterrânea irão influenciar fortemente o padrão planimétrico das cavernas. Após o levantamento topográfico é possível observar que a configuração espacial das cavernas segue determinados padrões, tais como dendrítico, reticulado, ramiforme, etc.

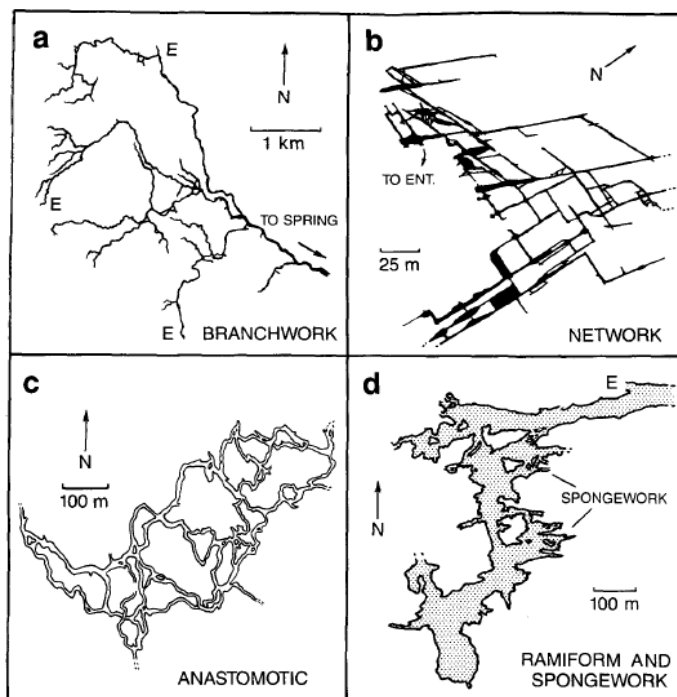


Figura 11: Classificação proposta por Palmer (1991).

Em 2003, pesquisando sobre a espeleogese em rochas carbonáticas Palmer (2003) publica no *Department of Earth Sciences, State University of New York, Oneonta, USA* um artigo com mais duas classes à proposta de 1991. Uma delas é a divisão da classe espongiforme/ramiforme e a criação do padrão reticulado (figura 12).

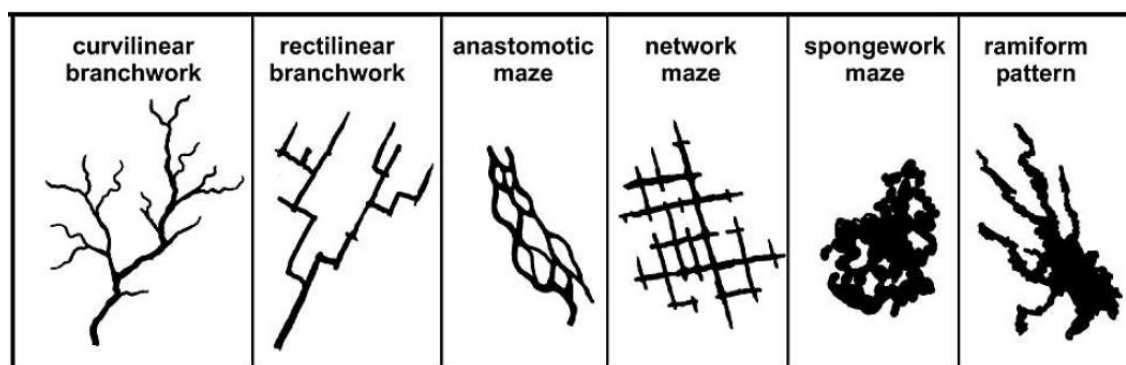


Figura 12: Classificação planimétrica proposta por Palmer (2003)

De um modo geral a forma planimétrica das cavernas ferríferas somente em alguns casos pode ser classificada nos padrões propostos para cavernas carbonáticas, a exemplo da classificação clássica de Palmer (2001; 2003). É o caso

de algumas cavernas mais desenvolvidas que apresentam câmaras mais amplas interconectadas por passagens estreitas, classificadas como espongiiformes.

Nessas cavernas, as estreitas passagens podem estar associadas a conexões tardias. O que implica supor que as câmaras maiores são mais antigas e se desenvolveram inicialmente de modo isolado (AULER et al. 2014). O que se nota em relação às formas planimétricas das mais de 500 cavernas já estudadas em Carajás (PILÓ et al. 2014, COELHO et al. 2013, CALUX et al. 2011, PILÓ et al. 2010) é a predominância de pequenos salões únicos, com apêndices afunilados em pequenos canais. Na maior parte dos casos com planimetria disforme. No entanto, é possível identificar formas planimétricas semicirculares, bifurcadas, retangulares, afuniladas ou retilíneas.

A grande maioria das cavernas ferríferas tem dimensões reduzidas se comparadas às carbonáticas. Isso não é uma particularidade das cavernas de Carajás, mas também do Quadrilátero Ferrífero e outras áreas com rochas ferríferas. Em Carajás, o volume médio das cavernas é de aproximadamente 220 m³ e a maior parte delas tem volume inferior a esse. Cavernas de grandes dimensões ocorrem, mas são pouco frequentes. As maiores cavernas conhecidas na região têm volume entre 2.000 e 3.000 m³ (COELHO et al. 2013).

Calux (2013), analisando padrões morfológicos e geométricos em um conjunto de 160 cavernas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, constatou que 111 (69,4%) apresentaram padrão morfológico espongiiforme e suas formas mistas. Na classificação geométrica observou uma tendência maior de concentração nas tipologias triangular, retangular e elíptica que juntas representam 140 (87,5%) cavernas da amostra. Concluiu que os padrões morfológicos e geométricos das cavernas hospedadas em rochas ferríferas estão relacionados ao tipo de rocha em que estão encaixadas, ou seja, canga, formação ferrífera bandada ou no contato entre elas. As tendências de concentração certamente estão condicionadas pelo arranjo textural e estrutural de cada substrato, bem como seu comportamento frente a ação intempérica e hidrodinâmica.

Em 2015, realizando levantamentos para classificar a relevância de cavernas no bloco C, Serra Sul. Ataliba Coelho, Roberto Cassimiro e Luís Piló classificaram

cavernas ferríferas em dez classes (Figura 13), sendo elas: regular, afunilada, semicircular, bifurcada, retilínea, curvilínea, disforme (câmara simples), espongiforme, mista e disforme (câmara composta).

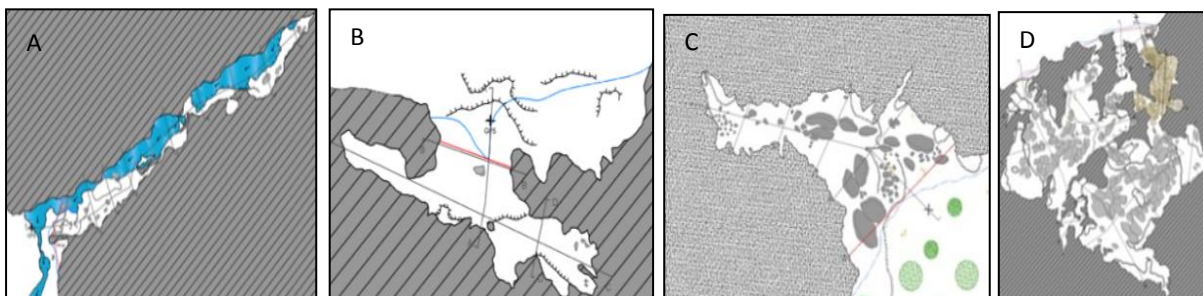


Figura 13: Exemplos de configurações planimétricas registradas nas cavernas estudadas em S11C. A) retilínea; B) bifurcada; C) afunilada; D) espongiforme. Fonte: Piló et al., 2015.

No referido trabalho foram analisadas 154 plantas baixa de cavernas, que possibilitaram a identificação de dois tipos de morfologia: câmaras simples (89; 58%), formadas por compartimento único e, câmaras compostas (65; 42%), constituídas por mais de um compartimento. Confirmando o padrão morfológico típico das cavernas da região: cavernas de salão único de pequenas dimensões.

Quanto à morfologia, as seções transversais e longitudinais das cavidades ferruginosas têm como principal característica as irregularidades nas paredes e teto, onde se incluem buracos, furos e ondulações denominadas de feições esponjosas. Essas feições são mais expressivas na canga. Podemos citar ainda pontões estruturais, claraboias, pendentes, pilares e canalículos (figura 14). Também já foram identificadas feições raras, como canais de drenagem profundos, buracos de dissolução de piso e caneluras nas paredes.

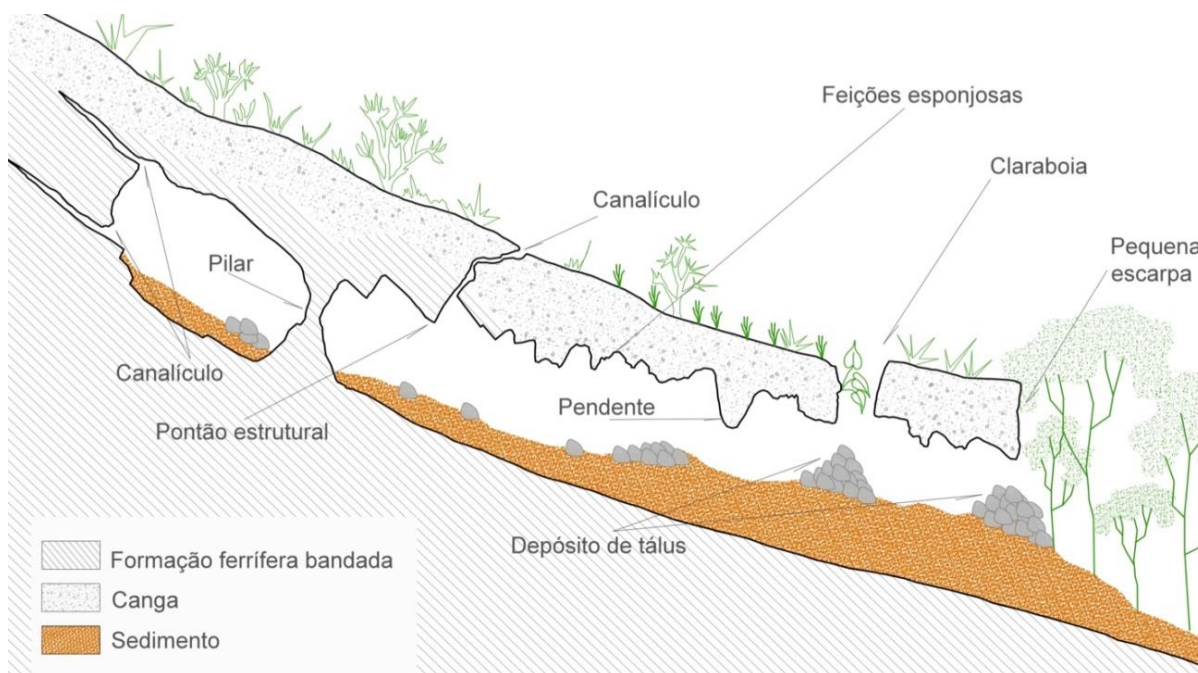


Figura 14: Perfil síntese de uma caverna ferrífera com as principais feições morfológicas.
Fonte: Piló et al., 2015.

5.3 ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS FERRÍFERAS

Nas cavernas ferríferas ocorrem formações minerais secundárias expressas em diversas formas, denominadas de espeleotemas (MOORE, 1952; WHITE, 1976; MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995).

Estudos de espeleotemas em cavernas ferruginosas são poucos. Um dos primeiros registros em nível mundial provêm de cavernas no Quadrilátero Ferrífero. Em 1842 o francês Noël Aimé Pissis reportou a existência de estalactites: “*Dans les cavités qui accompagnent souvent les couches de quartz, on trouve de petites stalactites de sous-sulfate de fer et des cristaux de néoctèse*” (PISSIS, 1842).

No Quadrilátero Ferrífero, mais especificamente na região de Águas Quentes, o mineralogista inglês William Jory Henwood menciona em 1871 estalactites e crostas em cavernas: “... *the hydrous oxide of iron hangs in stalactites from the roofs and forms tuberculated crusts on the floors...*” (HENWOOD, 1871).

Esses trabalhos pioneiros não tiveram prosseguimento imediato, já que há um grande lapso de tempo até as próximas referências. George Simmons, geólogo americano a serviço do *United States Geological Survey* (USGS) foi de fato o primeiro

a se empenhar em melhor conhecer a mineralogia dos espeleotemas das cavernas ferruginosas. Simmons (1964) realizou análises mineralógicas de algumas amostras encontradas em caverna localizada na Serra do Tamanduá (hoje conhecida como gruta Simmons). O mineral leucofosfita, então um mineral raro, foi descrito nesta caverna apenas pela sexta vez em todo o mundo.

Os primeiros estudos sobre a mineralogia dos espeleotemas na região de Carajás foram elaborados por Maurity & Kotschoubey (1995), que concentraram seus trabalhos no Platô de N1, na Serra Norte. Piló & Auler (2011) realizaram estudo sobre a tipologia e a mineralogia de espeleotemas em um grupo de cavernas nas serras Sul e Norte, assim como nas proximidades de Canaã dos Carajás (Projetos Níquel do Vermelho e Cristalino). Neste estudo foram analisadas 68 amostras. A grande maioria dos espeleotemas é representada por feições de pequeno porte e com mineralogia representada por óxidos/hidróxidos de ferro, sulfatos, fosfatos e silicatos. Tipologicamente representados por: coraloide, crosta de óxido-hidróxido, crosta branca, crosta cinza-esverdeada, escorrimento, microtravertino, pingente estalactite, estalagmite, coluna, cortina e "bateia".

Estalactites, estalagmites e colunas são espeleotemas raros nas cavernas de Carajás (figura 15). Piló & Auler (2011) colocaram que as estalactites só foram, até o momento, encontradas em duas cavernas em rochas ferríferas no país, uma delas em Serra Sul (S11D-83) e outra em Serra Norte (N4WS-67). Segundo os autores, a origem dos fosfatos dessas cavernas ainda está sob investigação, no entanto, é difícil aceitar que esses minerais sejam originados, exclusivamente, a partir do guano, principalmente os fosfatos que formam as estalactites. É possível que esses minerais sejam provenientes de outros minerais fosfáticos presentes, de forma incomum, na rocha, embora isso necessite de uma investigação mais detalhada.



Figura 15: Conjunto de espeleotemas raros na caverna S11B_0094. Foto: Allan Calux.

Segundo os referidos autores, os demais espeleotemas são comuns, embora a sua abundância varie muito de uma gruta para outra. Encontram-se principalmente nos pisos, nos blocos abatidos e nas paredes, sendo raros nos tetos. Três categorias de espeleotemas foram identificadas de acordo com a sua composição, ou seja, espeleotemas de óxidos-hidróxidos, de fosfatos e de sulfatos de Al e/ou Fe, com presença eventual de Ca e K. O grupo dos fosfatos é o mais diversificado e já registrou minerais raros em cavernas (PILÓ et al., 2016).

Auler & Piló, 2009; Auler et. al., 2011, postulam que na formação de coraloídes em Carajás existe uma interação entre deposição química e material biológico (bactérias, líquens e musgos), no qual, fatores como incidência de luz, circulação de ar e umidade influenciam na formação e desenvolvimento destes espeleotemas.

Silva et al. (2015) analisou três tipos de espeleotemas na caverna N4E_0029 - coraloíde, crosta branca e crosta amarela. O material predominante no coraloíde é goethita. Nas crostas branca e amarela ocorrem capeando a superfície das formações ferríferas e em micro cavidades das amostras. Em análise de MEV apresentam texturas orgânicas, relacionados provavelmente a fungos, bactérias e líquens. As

análises de sistema de energia dispersiva-EDS demonstram presença de carbono, ferro, silício e cloro. No entanto, diferente do proposto por Auler & Piló 2009; Auler et al., (2011), os coraloídes da cavidade em questão não apresentam crosta de microrganismos, isso ocorre provavelmente devido a uma pequena reentrância na morfologia da cavidade similar a um pequeno salão protegido de incidência de luz. A evolução dos coraloídes pode ocorrer sob duas condições: eufóticas e afóticas (Figura 16).

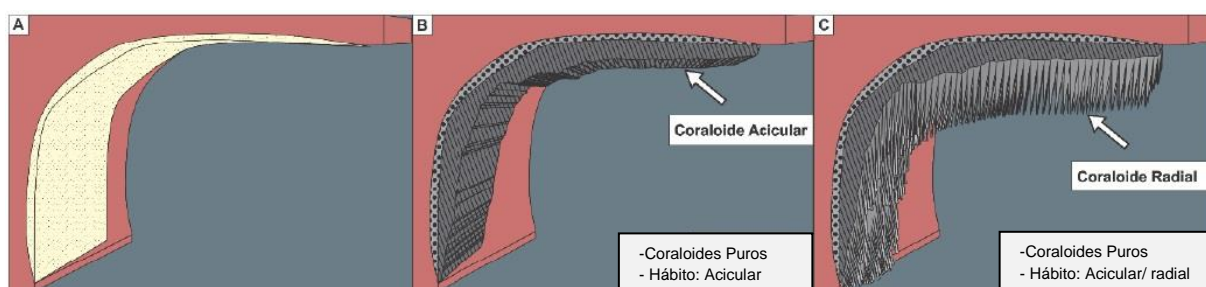


Figura 16: SISTEMA AFÓTICO: A- Cavidade sem influência de luz e que possui camada de Arenito. B- Início da precipitação do gel sem interferência de microrganismos, com desenvolvimento do Coraloíde Acicular puro de hábito acicular. C- Estágio final de Coraloídes puros que além de hábito acicular, ocorre também espículas de hábito radial caracterizando o Coraloíde Radial (SILVA et al. 2015).

Albuquerque et al. (2015), através de microscopia óptica (MO), difração de Raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) pesquisou dois espeleotemas das cavernas N4E-0008 e N4WS-0072, coraloíde e crosta branca, respectivamente, ambas na Serra Norte, que se desenvolveram em zonas porosas e permeáveis (interface jaspilito/canga). O coraloíde exibiu macroscopicamente coloração marrom-avermelhado e hábito botroidal. Apresenta forma zonada, marcada pela alternância na concentração de sílica e ferro nas bandas amorfas, acompanhada pela mudança de coloração, avermelhada no contato com o jaspilito, creme-amarronzado na porção intermediária e a borda avermelhada. O coraloíde é composto essencialmente por sílica amorfa, cimentando grãos subangulosos a subarredondados de hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), alunita ($\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$) e quartzo (SiO_2), que variam entre 0,1 a 0,2 mm e apresentam feições de dissolução.

A crosta branca que ocorre sobre a canga laterítica apresenta espessura de aproximadamente 0,4 mm. É constituída por cristais de leucofosfita ($\text{KFe}_2(\text{PO}_4)_2\text{OH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com birrefringência baixa a moderada, textura coliforme e laminações alternadas (ALBUQUERQUE et al. 2015).

A fim de entender e avaliar como se deu o processo de intemperismo químico sobre a caverna S11D_0083, localizada em Serra Sul, no bloco D. Sousa et al. (2015), utilizando métodos de DRX e microscopia ótica, realizou caracterização mineralógica e petrográfica da rocha da referida caverna, considerando a coloração e os aspectos texturais da rocha, porções de coloração avermelhada, coloração branca e porções de coloração amarelada com textura gelatinosa.

A porção avermelhada apresentou cristais de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Na porção branca foi indentificado montmorilonita ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2$), rancieita ($(\text{Ca}, \text{Mn})\text{Mn}_4\text{O}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A porção amarelada exibiu gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3), ferrowillieita ($\text{AlFe}_2\text{Na}(\text{PO}_4)_3$) e nissonita ($\text{Cu}_2\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$). A partir da assembleia mineralógica presente, sugeriu que a rocha estudada tratava-se de uma rocha basáltica enriquecida em piroxênio e plagioclásio (SILVA et al. 2015).

Pinheiro et al. (2015), também utilizando métodos de DRX e microscopia ótica, analisou petrograficamente 12 amostras, analisando características como cor, textura, forma, tamanho e disposição na rocha hospedeira e 14 amostras por DRX de duas cavernas, uma na Serra Sul e outra em Serra Norte. Na caverna N4WS_0067 os espeleomas identificados desenvolvem-se no teto, parede e piso e apresentam formas variadas identificadas como: parafuso, dedo, esfera e estalactite. A análise por DRX identificou os seguintes minerais: A) esfera – esfeniscidita ($(\text{NH}_4, \text{K})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{OH}](\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e nitromagnesita ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2(6\text{H}_2\text{O})$); B) parafuso-leucofosfita ($\text{KFe}_{23+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), esfeniscidita ($(\text{NH}_4, \text{K})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{OH}](\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$); C) dedo - leucofosfita ($\text{KFe}_{23+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), esfeniscidita ($(\text{NH}_4, \text{K})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{OH}](\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e quartzo (SiO_2); D) estalactite - esfeniscidita ($(\text{NH}_4, \text{K})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{OH}](\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), leucofosfita ($\text{KFe}_{23+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e fosfosiderita ($\text{Fe}(\text{PO})_4(\text{H}_2\text{O})_2$).

Na caverna S11D_0083 foram identificados os seguintes minerais em seus respectivos espeleotemas; A) revestimento cristalino – esfenicidita $(\text{NH}_4,\text{K})(\text{Fe}^{3+},\text{Al})_2[\text{OH}(\text{PO}_4)_2]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2). B) coraloide - brushita $(\text{CaPO}_3(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O})$, Gipso $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, monetita $(\text{CaPO}_3(\text{OH}))$. C) botrioide – gipso $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, quartzo (SiO_2), silvialita $(\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4))$. D) crosta amarelada – goethita $(\text{Fe}^{3+}(\text{OH}))$, hematita (Fe_2O_3) , maghemita (Fe_2O_3) . E) escorrimento – leucofosfita $(\text{KFe}^{2+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, esfenicidita $(\text{NH}_4,\text{K})(\text{Fe}^{3+},\text{Al})_2[\text{OH}(\text{PO}_4)_2]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2). F) pingente – esfenicidita $(\text{NH}_4,\text{K})(\text{Fe}^{3+},\text{Al})_2[\text{OH}(\text{PO}_4)_2]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), gipso $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, quartzo (SiO_2). G) crosta amarelada impregnada em canga – goethita $(\text{Fe}^{3+}(\text{OH}))$, hematita (Fe_2O_3) , maghemita (Fe_2O_3) , fluorapatita $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F})$. H) Guano seco – leucofosfita $(\text{KFe}^{2+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, hematita (Fe_2O_3) , maghemita $(\text{Fe}_{21.16}\text{O}_{31.92})$, quartzo (SiO_2). A maioria das formas de espeleotemas apresentam minerais fosfáticos, com exceção do botrioide e da crosta amarelada.

Segundo Piló et al., (2016), o grupo dos fosfatos são os mais diversificados nas cavernas da Serra dos Carajás, seguido dos óxidos-hidróxidos, silicatos e sulfatos. Dezessete minerais fosfáticos (leucofosfita, strengita, fosfosiderita, sfeniscidita, taranakita, rodolicoita, hureaulita, vashegyita, variscita, fosfoferrita, hannaiyta, eosforita, brushita, monetita, luorapatita, ferrowillieita e nissonita) já foram registrados nas cavernas da região, representando 32% dos minerais fosfáticos já identificados em cavernas no mundo, segundo a listagem de Hill & Forti (1997). Sete desses minerais não constam na lista dos fosfatos já identificados no mundo: sfeniscidita, rodolicoita, hureaulita, fosfoferrita, eosforita, ferrowillieita e nissonita.

5.4 ORIGEM DOS FOSFATOS NOS ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS FERRÍFERAS

George Simmons foi quem elaborou as primeiras ideias sobre a mineralogia de espeleotemas em cavernas ferríferas e a ligação entre minerais fosfáticos e o guano destas cavernas (SIMMONS, 1963, 1964).

Minerais fosfáticos são aqueles nos quais o elemento fósforo está inserido em uma estrutura tetraédrica $(\text{PO}_4)^{3-}$. A maioria deste não ocorre comumente em cavernas, porém alguns foram verificados apenas em cavernas (HILL & FORTI, 1997).

Ainda segundo Hill & Forti (1997), os minerais fosfáticos são extremamente insolúveis, porém, por meio de processos que envolvem dióxido de carbono e substâncias orgânicas, esses minerais podem apresentar maior solubilidade. Minerais fosfáticos em cavernas são dissolvidos e precipitados em resposta à variação de acidez e disponibilidade de cátions da solução. Também podem ser derivados da alteração, decomposição e desidratação de outros minerais fosfáticos. A acidez gerada pelo guano também pode determinar qual mineral fosfático poderá se formar.

Inicialmente vale a pena lembrar que a canga é bem mais recente que a formação ferrífera, e também é bem mais recente que os depósitos de minério de ferro. Ou seja, até o relevo ser recoberto pela canga, este sofreu vários milhões de anos de intemperismo. Desta forma seria possível ter-se formado um solo ou uma rocha decomposta a semi-decomposta que posteriormente foi recoberta pela canga. A própria formação da canga já auxiliaria na modificação (intemperismo) do substrato.

Segundo Hill & Forti (1997), a maioria dos minerais fosfáticos de cavernas são derivados do guano de morcegos. De forma menos expressiva podem ser originados do guano de pássaros, brecha de ossos ou outro material orgânico. O guano de morcegos, segundo os referidos autores, é rico em nitrogênio e fósforo. A decomposição e lixiviação do guano envolve inicialmente a lixiviação do nitrogênio, que é muito solúvel, deixando o fosfato que é menos solúvel. Diante de processos de solubilização, envolvendo dióxido de carbono e substâncias orgânicas (bactérias etc.) o fósforo se torna mais solúvel.

Analisando a composição química do guano da caverna Kisarawe, na Tanzânia, Mlya & Sagamiko (2008), registraram que o produto era rico em Nitrogênio (4,7%) e outros minerais, especialmente fósforo (4662.5ppm).

Tabela 2: Composição química do guano de morcego encontrado na caverna Kasarawe, Tanzânia. Fonte: Mlya & Sagamiko (2008)

Componentes	Quantidade
% Nitrogênio total (N)	4.71
% Matéria Seca (DM)	90.87
% Fibra bruta (CF)	30.06
% Conteúdo de cinzas	6.99
Zinco (Zn) (ppm)	95.6

Cobre (Cu) (ppm)	33.44
Magnésio (Mg) (ppm)	852.4
Cálcio (Ca) (ppm)	892.6
Fósforo (P) (ppm)	4662.5
Sódio (Na) (ppm)	759.2

Segundo Onac & Forti (2011), o guano ocasiona uma grande variedade de complexas reações (geralmente guiada por micro-organismos) liberando ácidos nítrico, fosfórico e sulfúrico, os quais reagem com a rocha e sedimentos para formar mais de 100 minerais secundários dentro de cavernas.

A primeira análise sobre a origem dos fosfatos nos espeleotemas das cavernas da Serra de Carajás foi realizada no trabalho de Maurity & Kotschoubey (1994), no qual foi colocado que a principal fonte é o guano, gerado a partir das colônias de morcegos. A lixiviação deste material por águas percolantes desprende o fósforo que pode combinar com o ferro liberado na evolução química do perfil laterítico. Segundo os referidos autores, o meio laterítico pode dificilmente ser considerado como fonte de fósforo. Por outro lado, são conhecidos depósitos, localmente notáveis, de guano de morcego, em particular nas grutas do N 1 e da Guarita, onde justamente ocorrem os mais relevantes exemplos de espeleotemas fosfáticos.

Maurity & Kotschoubey (1994) reafirmam que o fósforo, incluindo enxofre, potássio e cálcio foram fornecidos por excrementos de morcegos que, como hoje em dia, habitam as cavernas. Depósitos espessos de guano decomposto foram encontrados nas grutas estudadas muitos deles próximos aos espeleotemas. Essa íntima relação espacial entre o guano e os espeleotemas sugere fortemente uma relação genética entre os dois produtos.

Couto, et al. (2010), analisando oito tipos de minérios de ferro de diferentes minas da Vale, afirmaram que a forma na qual o fósforo se associa nos minerais de ferro ainda não é bem conhecida. No entanto, com base nos resultados encontrados para amostras sintéticas de goethita (α -FeOOH) e hematita (α -Fe₂O₃) pode-se inferir que o fósforo, provavelmente na forma de fósforo, se encontra adsorvido na superfície das partículas ou ocluído nos microporos. Outra possibilidade é que esteja localizado dentro da estrutura dos oxi-hidróxidos ou ainda como um mineral fosfatado.

Piló & Auler (2011) atribuem a origem dos minerais que compõem os espeleotemas a duas fontes, à rocha encaixante e, principalmente, ao guano de morcegos.

Embora teores mensuráveis de fósforo ocorram no meio laterítico, dificilmente podem ser considerados como a fonte de fosfatos dos espeleotemas. O processo teria se desenvolvido por meio da lixiviação do guano pela água de percolação. O nitrogênio é parcial ou inteiramente eliminado junto com os elementos mais solúveis, permanecendo apenas o fósforo, combinando-se em diversas proporções com íons hidroxila da água e outros elementos presentes na rocha e nos sedimentos das cavernas (HILL & FORTI, 1986; PINHEIRO et al., 2015; ALBUQUERQUE et al., 2015).

Entretanto, Taylor et al. (2001) têm registrado apatita de origem hidrotermal nas formações ferríferas da província de Hamersley, na Austrália. O fósforo registrado nas formações ferríferas foi gerado pela decomposição de apatita, que é de origem hidrotermal, associada à mineralização do ferro.

Pinheiro et al., (2015) lançou duas hipóteses para formação dos espeleotemas fosfáticos, ambas relacionadas ao guano. Segundo os autores, há uma relação com o guano das colônias de morcegos no teto da cavidade. Os íons fosfáticos lixiviados interagem com a rocha hospedeira produzindo espeleotemas no piso da cavidade. Os espeleotemas fosfáticos gerados no teto formaram depósitos químicos tipo estalactites, já os da parede são formados pelo escorrimento da água.

A outra hipótese está relacionada ao conteúdo de vapor no interior das cavidades estudadas, produto do guano de morcegos, por um processo de umidificação dentro da cavidade que torna o ar úmido, havendo em suas partículas soluções contendo H_2O e P_2O_5 o que explica a distribuição de espeleotemas fosfáticos em todas as partes: teto, parede e piso. Entretanto, neste caso admite-se que a distribuição e gênese dos espeleotemas fosfáticos estejam relacionadas ao guano de morcegos.

A origem do fósforo presente em alguns espeleotemas pode não ser exclusivamente desta fonte. As fases de retração e expansão da floresta, processos de degradação e formação da canga podem ter contribuído com parte da disponibilidade de fósforo no maciço, conseqüentemente nos espeleotemas.

6 RESULTADOS

6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVERNAS ESTUDADAS

6.2.1 Caverna N4WS_0067

A caverna N4WS_0067 localiza-se na Serra Norte, no platô de N4, nas coordenadas UTM 589452 E/ 9328690 N, elevação 584m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 216,0m, desnível de 12,4m, área de 700m² e volume de 1.698m³.

A vegetação do entorno é predominantemente campo rupestre ferruginoso, mas há floresta de encosta e de galeria a montante.

A caverna está localizada na média vertente, inserida em um pequeno afloramento rochoso, isolado, de canga detritítica com uma única entrada voltada para sul, perpendicular ao maior gradiente da vertente.

O desenvolvimento da caverna é condicionado por dois eixos, LW/NS. As paredes são irregulares. A canga detritítica é a litologia predominante, mas há pontuais ocorrências de formação ferrífera bandada.

Com aspecto esponjiforme, os salões e as galerias são interconectados por estreitamentos, feições características de cavernas maiores em rochas ferríferas. No salão de entrada há sedimento argiloso, avermelhado com matações e seixos esparsos. Nos demais salões o sedimento é argiloso de cor marrom-claro. Há guano depositado no piso e sobre blocos (o que constitui um depósito abundante), porém não aparenta ser recente, pois atualmente não há uma colônia de morcegos compatível com as dimensões do depósito.

O piso apresenta inclinação concordante a vertente (Figura 17), aspecto ruiforme, irregular, repleto de canais de escoamento concentrado no piso, alguns com mais de 2,5 metros de profundidade (Figura 18). Observa-se ainda buracos de corrosão e ravinas no piso, além de pináculos residuais no piso. Estes processos contribuíram para uma rara morfologia do piso, que a difere das demais cavernas amostradas. Principalmente no segundo salão, o piso além das características já mencionadas ocorrem em partes suspensas onde observa-se concentração de fluxo hídrico e recargas dos canais de escoamento superficial concentrado.

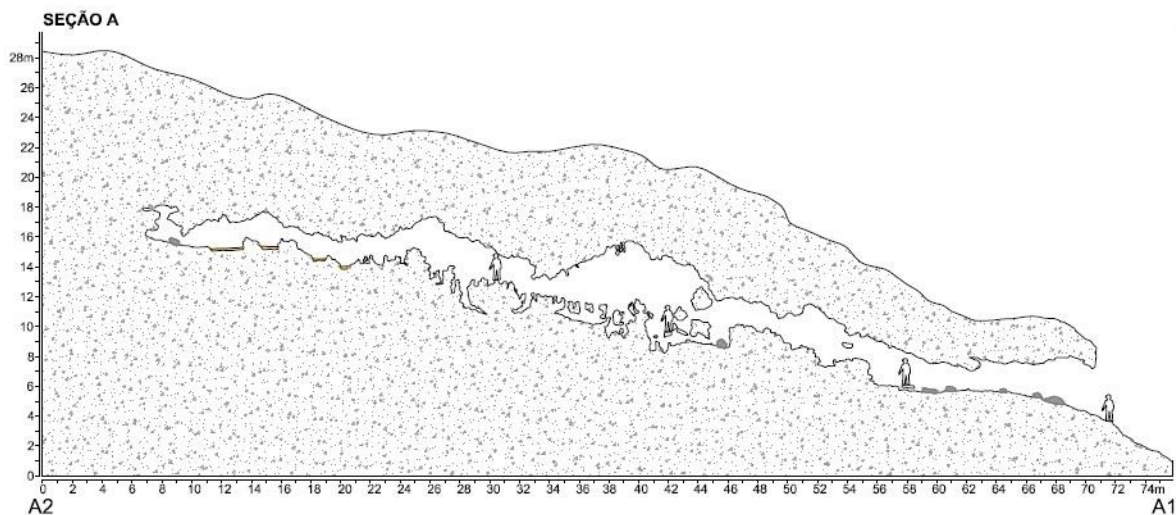


Figura 17: Perfil longitudinal da caverna N4WS_0067.

Canalículos e fraturas são os principais responsáveis pelo aporte de recurso hídrico à caverna. No período chuvoso, esses processos são potencializados carreando sedimento e depositando, principalmente, na entrada da caverna.



Figura 18: (A, B, C e D) Piso com evidentes processos de corrosão e erosão: canais de escoamento concentrado, sulcos e buracos semi-circulares resultado do gotejamento; pináculos residuais também foram observados, além de caneluras (B).

6.2.1.1 Espeleotemas

Foram coletadas seis amostras (Figura 19) de espeleotemas: A1) “dedo”; A2) estalactite; A3) coralóide do tipo *Pop-Corn*; A4) parafuso; A5) coralóide botrioidal; e A6) cortina.

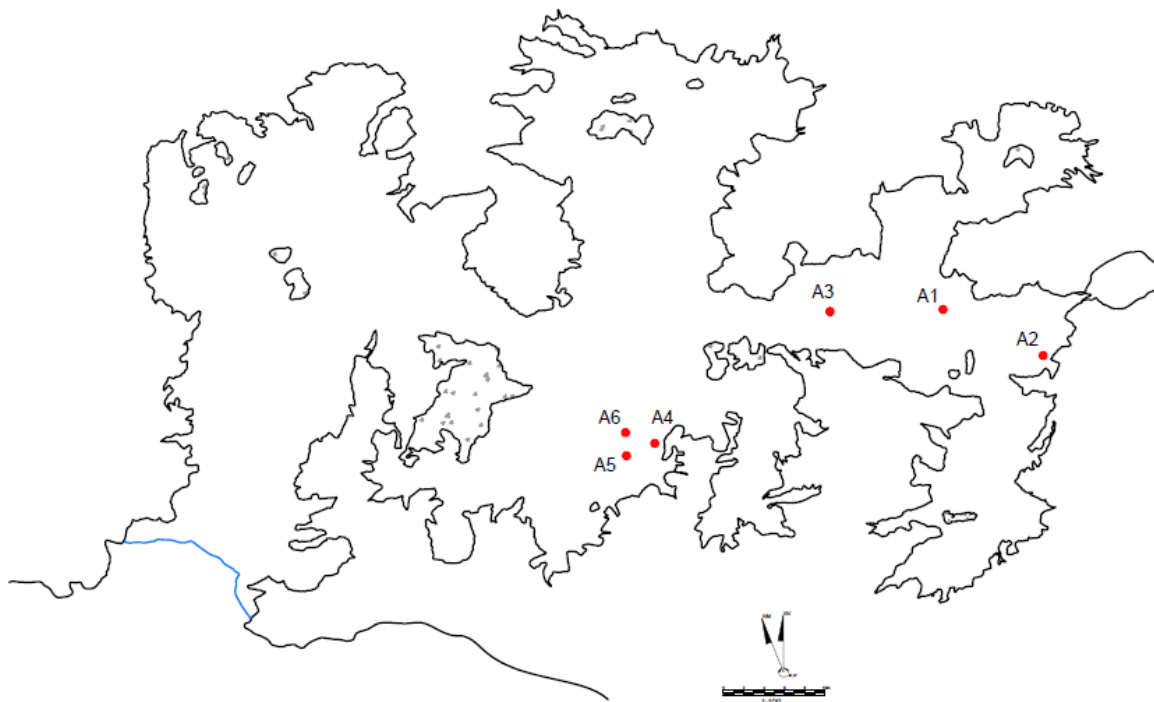


Figura 19: Localização das seis amostras de espeleotemas.

Os espeleotemas estão presentes em todos os setores da caverna, mas no terceiro salão há uma concentração dos depósitos químicos mais expressivos e importantes cientificamente, ou seja, as estalactites, estalagmites e colunas. Crostas de diversas tonalidades e hábitos de crescimento recobrem blocos, partes das paredes e outros espeleotemas. Também podem ser observadas associações de espeleotemas como “parafusos e dedos” sobre estalactites e colunas; coralóides de hábito botrioidal sobre crostas e blocos; sobreposição de crosta; e escorrimento sobre crostas.

As principais concentrações estão associadas a fraturas (Figura 20) e sobre outros depósitos químicos. Espeleotema do tipo “coluna” são menos frequentes em cavernas ferríferas, por isso nenhuma amostra foi coletada nesse tipo de depósito.









Figura 20: A) Conjunto de estalactites; B) Estalactites e cortinas na parede “W” do segundo salão; C) Coluna; D) Estalactites seguindo à fratura; E: Sobreposição de “parafusos” e “dedos” sobre coluna.

6.2.1.2 Resultado das DRX

As seis amostras foram submetidas a DRX. A seguir são apresentados os resultados (Tabela 3).

Tabela 3: Resultado da DRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0067

Nº DA AMOSTRA	FOTO DAS AMOSTRAS	ESPELEOTEMA - PONTO DE COLETA	COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA
N4WS_0067-A1		Coraloide sobre estalactite	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Sfeniscidita	$Fe_2(NH_4)(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$
			Fosfosiderita	$FePO_4(H_2O)_2$
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
N4WS_0067-A2		Estalactite no teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
N4WS_0067-A3		Coraloides na parede	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$

N4WS_10067-A4		Coraloides na parede	Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Andalusita	$\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$
			Fosfato de cálcio	$\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$
N4WS_0067-A5		Coraloides na parede	Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Sfeniscidita	$\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
			Hematita	Fe_2O_3
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
N4WS_0067-A6		Escorrimentos na parede	Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

6.2.1.3 Resultado das FRX

Na caverna N4WS-0067 o óxido de ferro com média de 40% foi o elemento dominante, e o pentóxido de fósforo com 38% o segundo mais abundante. Ou seja, o ferro é o principal mineral de combinação com o fósforo. Os demais elementos das

seis amostras (Tabela 4) apresentaram pequena participação, inferiores a 1%. O fator PF variou entre 18,4% e 20,3%.

Tabela 4: Resultado da FRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0067

N4WS_0067	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	Fe₂O₃	PF
A1	0,08	1,82	0,436	37,4	<0,001	0,188	0,128	39,2	20,3
A2	0,124	0,503	0,211	38,2	0,054	1,56	<0,001	40,5	19
A3	0,135	1,05	0,407	36,6	0,194	2,8	0,074	39,5	18,4
A4	<0,001	0,719	0,303	37,6	0,058	0,235	0,047	40,9	19,8
A5	<0,001	0,648	0,404	33,7	0,071	0,329	<0,001	46	18,5
A6	<0,001	0,375	0,287	37,4	0,034	0,137	<0,001	41,6	20

6.2.2 Caverna N4WS_0072

A caverna N4WS_0072 localiza-se na Serra Norte, platô de N4, nas coordenadas UTM 589675 E/ 9328540 N, elevação 616m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 126,0m, desnível de 16,86m, área de 432,5m² e volume de 878m³.

Caverna inserida na alta vertente, no interior do platô residual. Entrada ampla e levemente arqueada voltada para Norte. A escarpa forma um pequeno anfiteatro. Há predomínio de campo rupestre ferruginoso no entorno.

Aspecto esponjiforme com maior desenvolvimento seguindo o eixo SSE-NNW. Paredes irregulares localmente perfuradas por gotejamento. Teto arqueado e mais alto na entrada.

A caverna pode ser compartimentada em três salões, que são conectados por estreitamentos. No segundo salão há uma claraboia que aporta expressiva quantidade de sedimentos argilosos. Na galeria que conecta o segundo salão com o salão de entrada, processos relacionados à dinâmica hídrica carrearam todo o sedimento e erodiram partes do piso (Figura 21).



Figura 21: A) Piso rochoso, recobertos por matacões e canais rochosas de escoamento; B) Piso corroído, com buracos de corrosão e erosão semicirculares resultado do gotejamento e efeito “splash”. Caneluras nas paredes e pináculos residuais no piso.

Piso ravinado, perfurado, recoberto por guano, principalmente no segundo e terceiro salão, com inclinação concordante a vertente (Figura 22). No terceiro salão é relativamente plano e argiloso.

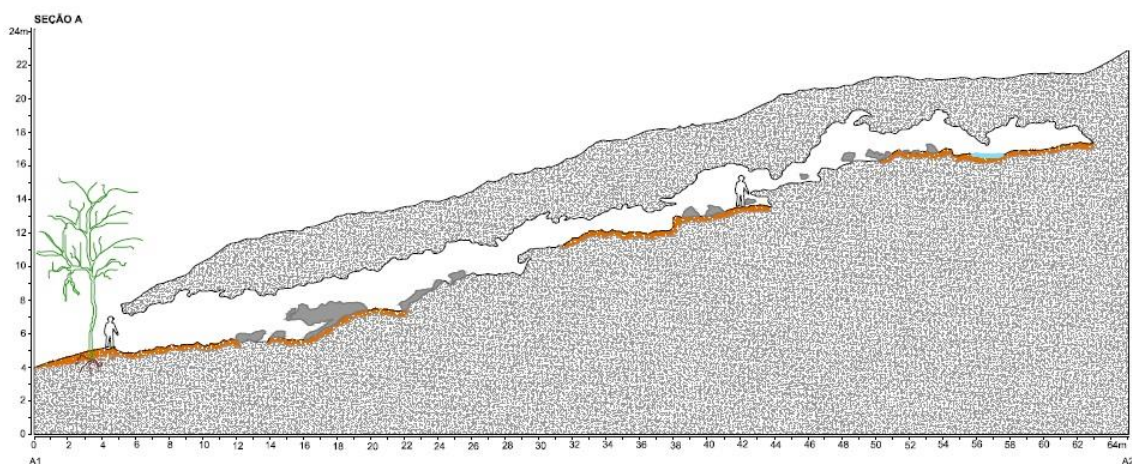


Figura 22: Perfil longitudinal da caverna N4WS_0072 indicando a concordância da inclinação do piso com a vertente.

6.2.2.1 Espeleotemas

Foram coletadas três amostras (Figura 23) de espeleotemas: A1) crosta delgada; A2) estalactite; A3) crosta delgada.

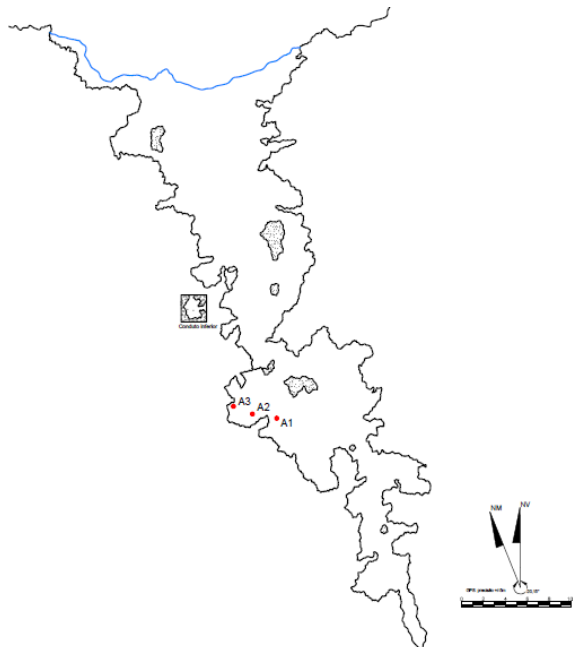


Figura 23: Localização das amostras de espeleotemas coletados.

O principal conjunto de espeleotemas está concentrado no segundo salão, na parede leste e isoladamente no teto (Figura 24). Crostas são os depósitos predominantes, mas os mais importantes são as estalactites (amostra N4WS_0072-A2).

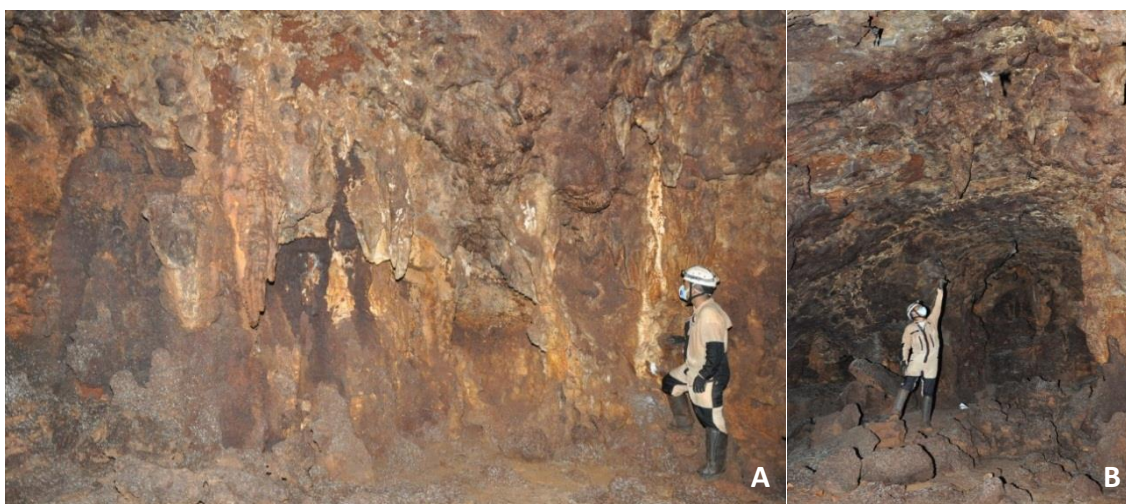
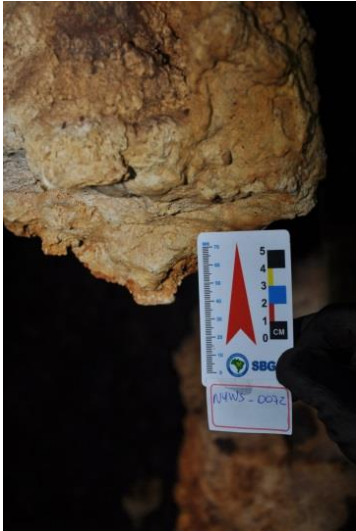




Figura 24: A) Local onde se concentra o mais importante conjunto de espeleotemas; B) Estalactite isolada no teto.

6.2.2.2 Resultado da DRX

As três amostras foram submetidas à DRX. Os resultados são apresentados na tabela abaixo (Tabela 5).

Tabela 5: Resultado da DRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0072

N ^o da Amostra	FOTO DAS AMOSTRAS	ESPELEO TEMA - PONTO DE COLETA	COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA
N4WS_0072-A1		Crosta no teto	Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Sfeniscidita	$\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
N4WS_0072-A2		Estalctite no teto	Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Sfeniscidita	$\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Fosfosiderita	$\text{Fe} + 3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

N4WS_0072-A3		Crota na parede	Strengita	FePO4 2H2O
			Fosfosiderita	FePO4(H2O)2

6.2.2.3 Resultado da FRX

Na caverna N4WS-0072 destacam-se, novamente, o óxido de ferro com média de 40%, elemento dominante, e o pentóxido de fósforo, com 37%. Porém, o óxido de alumínio apresenta percentual médio de 1,5% e todos os demais elementos das três amostras (Tabela 6) apresentaram valores abaixo de 1%. O fator PF variou entre 19,5% a 20%, precisamente.

Tabela 6 Resultado da FRX dos espeleotemas coletados na caverna N4WS_0072

N4WS_0072	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	Fe2O3	PF
A1	<0,001	0,76	0,157	37,5	0,03	<0,001	0,058	41,3	19,9
A2	<0,001	1,17	1,11	37,7	0,024	0,084	<0,001	40,3	19,5
A3	<0,001	2	0,22	37,9	0,033	0,058	<0,001	39,5	20

6.2.3 Caverna N3_0023

A caverna N3_0023 localiza-se na Serra Norte, platô de N3, nas coordenadas UTM 586379 E/ 9331983 N, elevação 607m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 269,0m, desnível de 15,38m, área de 950m² e volume de 2.138m³.

Caverna com uma única entrada voltada para “NNW”, localizada na alta vertente, na ruptura da canga, no contato do campo rupestre ferruginoso com a Floresta Ombrófila Densa.

As paredes são irregulares em toda à caverna, principalmente no salão de entrada onde há evidentes de processos de dissolução, especificamente caneluras (Figura 25). Os salões são conectados por estreitamentos e galerias de pequenas dimensões.



Figura 25: Caneluras nas paredes indicando processos de corrosão na parede SSE.

O pacote rochoso sobre o teto da caverna é pouco espesso. Também se observa inclinação do piso em concordância com a vertente (Figura 26).

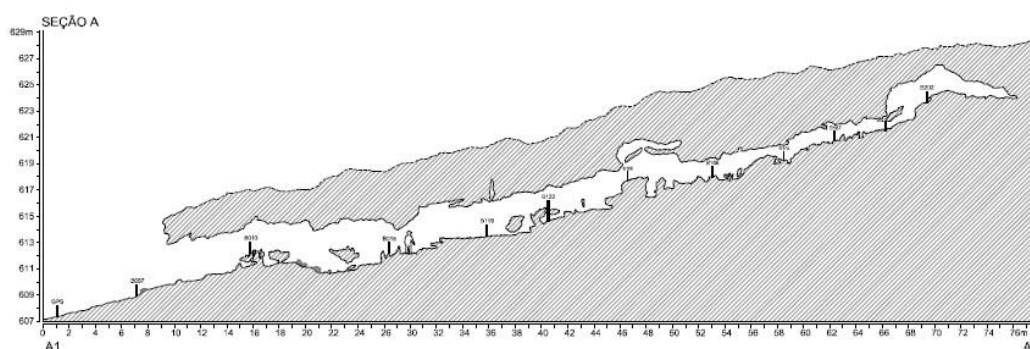


Figura 26: Perfil da caverna N3_0023 indicando concordância da inclinação do piso com vertentes e residuais de correntes erosivos ocorridos.

O piso da caverna é irregular, com porções recobertas por fezes de morcegos, ravinado (Figura 27), com canais de escoamento concentrado de até 2,0m de profundidade e buracos semicirculares resultado do gotejamento. Também podem ser

observados piláculos residuais e paleopisos em diferentes pontos da cavidade e blocos de tamanho maticões com aspecto polido.



Figura 27: (A) Piso com buracos, sucos e pináculos residuais; (B) Piso coberto por depósitos de guano; nas paredes canais e caneluras e; C) Paleopisos em diferentes níveis.

6.2.3.1 Espeleotemas

Foram coletadas sete amostras (Figura 28) de espeleotemas: A1) coralóide; A2) crosta laranja; a3) crosta branca friável; A4) crosta branca cristalizada; a5) crosta laranjada; a6) estalactite; e A7) coralóide tipo dedo.

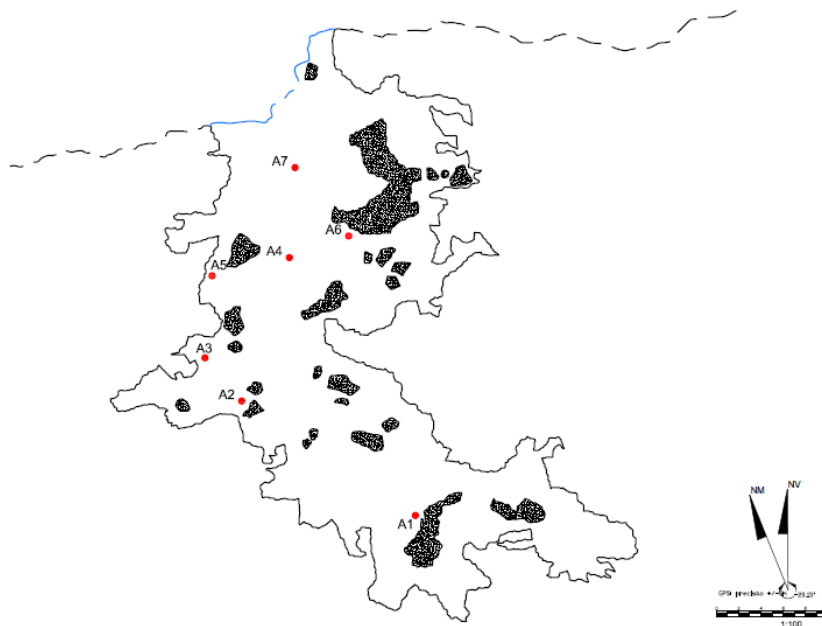



Figura 28: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.

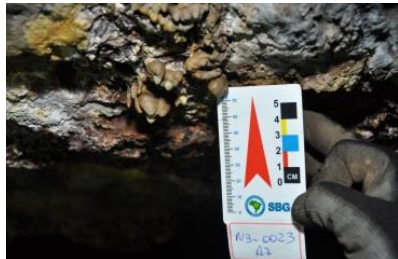
6.2.3.2 Resultado da DRX

As sete amostras foram submetidas à DRX sendo que os resultados serão apresentados abaixo (Tabela 7).

Tabela 7: Resultado da DRX na caverna N3_0023

Nº DA AMOSTRA	FOTO DAS AMOSTRAS	ESPELEOTEMAS - PONTO DE COLETA	COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA
N3_0023-A1		Crosta de teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Quartzo	SiO_2

N3_0023-A2		Crosta no contato piso parede	Sulfato de cálcio hidratado	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$
			Francoanellita	$\text{K}_3\text{Al}_5(\text{HPO}_4)_6(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$
			Gipso	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$
N3_0023-A3		Crosta na parede	Francoanellita	$\text{K}_3\text{Al}_5(\text{HPO}_4)_6(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$
			Leucofosfita	$\text{KFe}_2(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
N3_0023-A4		Crosta na parede	Newberyita	$\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
			Monetita	CaHPO_4
N3_0023-A5		Crosta no contato Piso/Parede	Gipso	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$
			Sulfato de cálcio hidratado	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$
			Francoanellita	$\text{K}_3\text{Al}_5(\text{HPO}_4)_6(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$
N3_0023-A6		Estalactite no teto	Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Sfeniscidita	$\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$

N3_0023-A7		Coraloide no teto	Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
			Hematita	Fe_2O_3
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

6.2.3.3 Resultado da FRX

Nas sete amostras da caverna N3-0023, o pentóxido de fósforo destaca-se por atingir valores com média de 26%. O óxido de ferro aparece com média de 17% entres as amostras. Outros elementos (Tabela 8) também apresentam percentuais consideráveis, óxido de magnésio (MgO) 3%, óxido de alumínio (Al₂O₃) 4%, trióxido de enxofre (SO₃) 8% e óxido de cálcio (CaO)7%, seguidos do óxido de potássio 2% (K₂O) e dióxido de silício 1,5% (SiO₂); os demais tem suas médias inferiores a 1%. O PF variou consideravelmente, entre 19,6% e 41,9%.

Tabela 8: Resultado da FRX na caverna N3_0023

N3_0023	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PF
A1	0,518	2,36	0,423	37,4	0,028	0,878	0,089	36,7	21,2
A2	0,103	4,78	1,79	11,5	18,8	1,58	18,4	0,609	41,9
A3	<0,001	19,2	2,22	43,7	0,044	5,52	0,068	3,63	25,4
A4	21,7	0,153	0,247	40	0,054	0,033	3,14	0,266	33,7
A5	0,448	3,1	1,63	8,21	25,2	0,721	27,5	0,715	31,9
A6	0,122	0,509	0,735	37,3	0,088	0,078	0,09	41,2	19,6
A7	<0,001	0,218	2,61	5,3	13,6	5,69	0,048	35,2	37

6.2.4 Caverna N3_0074

A caverna N3_0074 localiza-se na Serra Norte, platô de N3, nas coordenadas UTM 585168 E/ 9331968 N, elevação 524m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta

projeção horizontal de 283,0m, desnível de 14,0m, área de 782,5m² e volume de 1.296m³.

Caverna com entrada voltada para Norte, localizada na alta vertente, em uma das rupturas do relevo, no contato da vegetação de campo rupestre ferruginoso com a floresta.

A direção N/S condiciona o desenvolvimento preferencial da cavidade. Os condutos são interconectados por galerias com passagens estreitas e irregulares, gerando um aspecto esponjiforme. Os salões são conectados por estreitamentos e os diversos pilares contribuem para uma morfologia complexa.

As paredes são irregulares em toda caverna, com partes recobertas por crostas e processos de dissolução (Figura 29). São evidentes buracos de corrosão/erosão semicirculares abertos – borda erodida, canais, buracos e furos, gerando pisos ruiniformes.

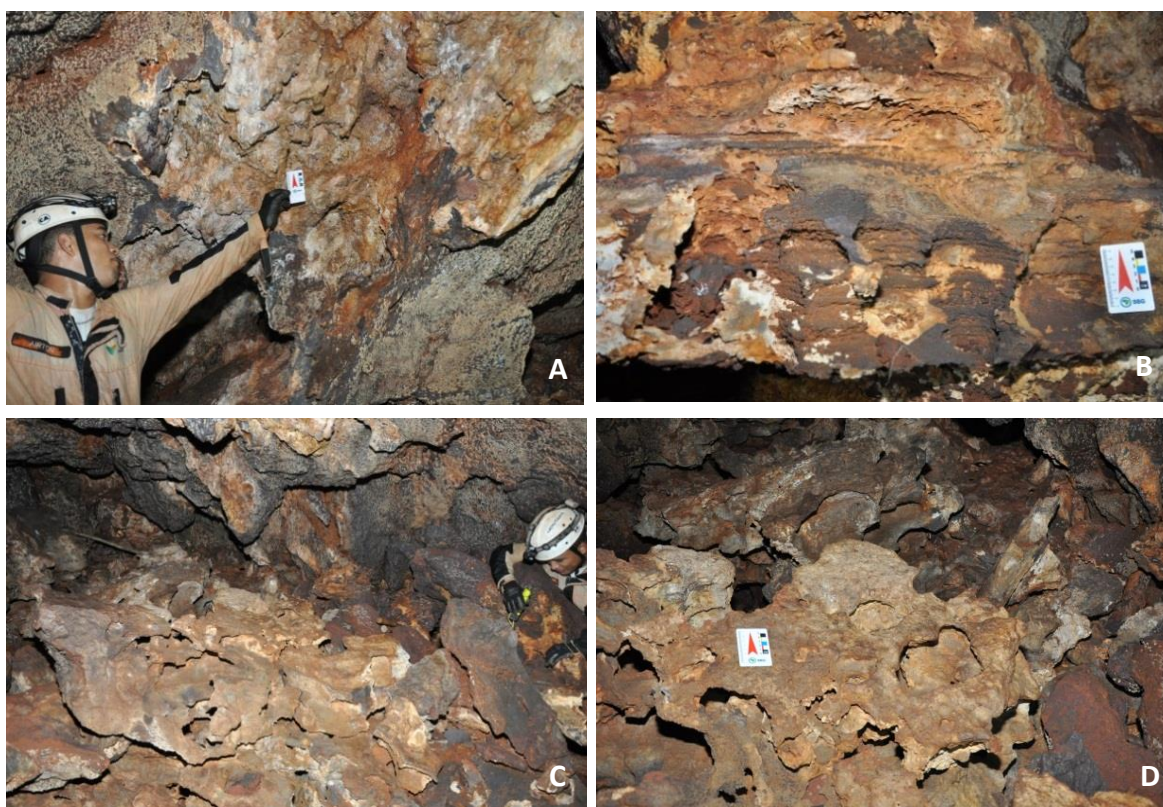


Figura 29: A) Espeleotemas no teto da caverna; B) caneluras nas paredes C e D) Piso ruiniforme com buracos, furos e pequenos canais.

Piso ascendente (Figura 30), com aspecto ruiniforme, caoticamente arranjado, com ravinas esparsas, sulcos de escoamento concentrado e com algumas lâminas desprendidas do próprio piso que foi erodido.

A quantidade de guano não condiz com o atual tamanho da colônia de morcegos. Pequenas concentrações podem ser observadas no salão dos espeleotemas, sobre blocos e nas galerias que conectam os salões.

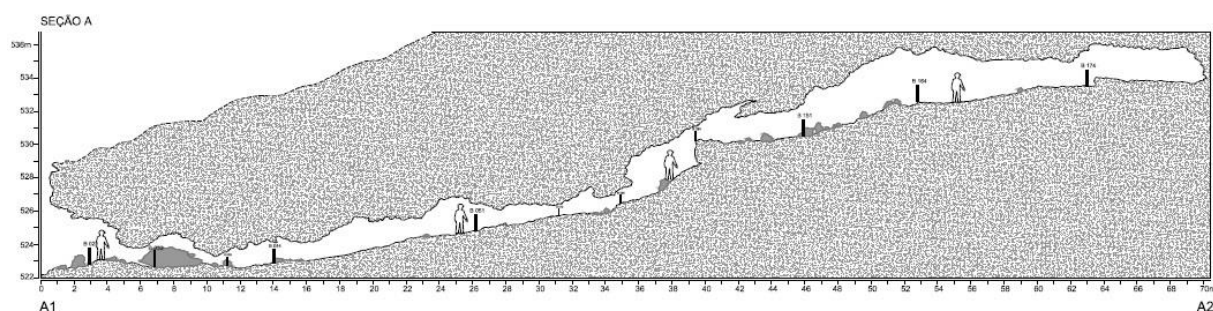


Figura 30: Perfil longitudinal da caverna N3_0074 indicando a concordância do piso com a vertente.

6.2.4.1 Espeleotemas

Foram coletadas três amostras (Figura 31) de espeleotemas: A1) coraloide do tipo *pop-corn* associado a crosta; A2) coraloide com hábito brotoidal; e A3) crosta cinza.

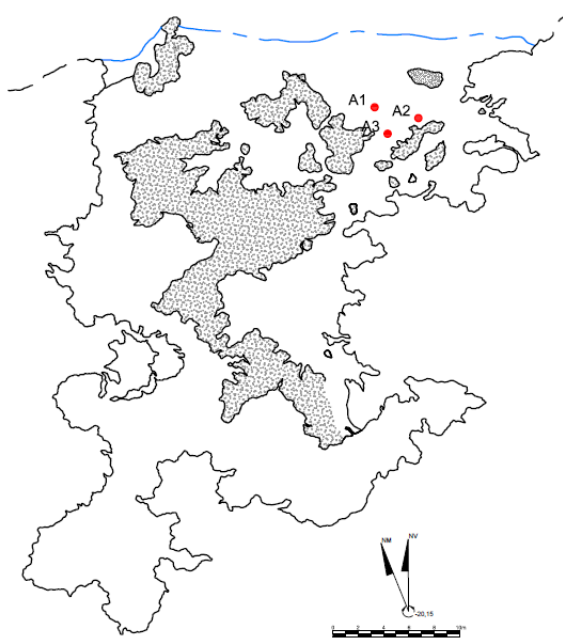


Figura 31: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.

Outros espeleotemas foram registrados como escorrimento, microestalactites na parede NW do primeiro salão, coraloides do tipo *pop corn*, crostas de tonalidades diversas e estalactites. Em função da presença de um ofídio peçonhento na passagem estreita para os demais setores da caverna, não foi possível fazer uma averiguação completada dos depósitos químicos. No entanto, arquivos fotográficos (Figura 32) da Fundação Casa da Cultura de Marabá (FCCM, 2009) evidenciam ocorrência das feições citadas acima.

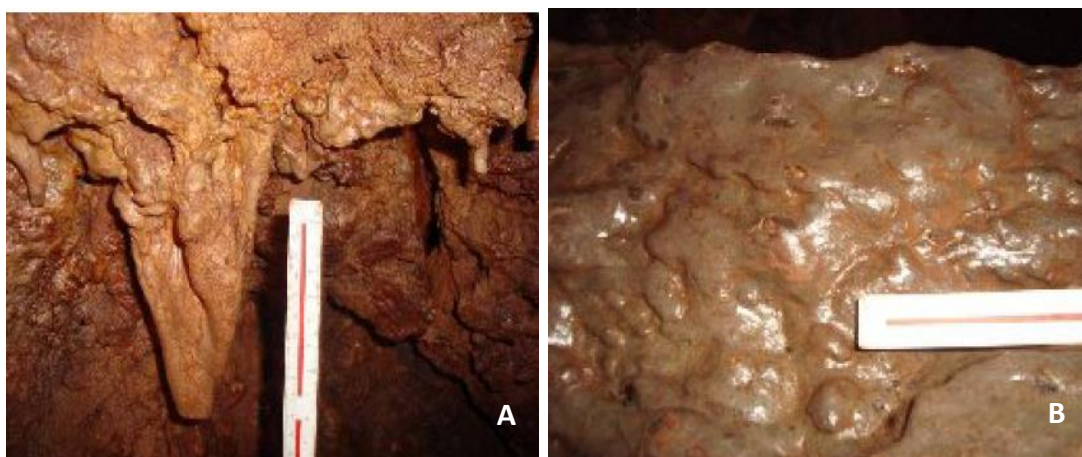





Figura 32: A) Estalactite; B) Crosta acinzentada. (FCCM, 2009).

6.2.4.2 Resultado das DRX

As três amostras foram submetidas à DRX quais os resultados serão apresentados abaixo (Tabela 9).

Tabela 9: Resultado da DRX na caverna N3_0074

Nº DA AMOSTRA	AMOSTRAS	ESPELEOTEMA - PONTO DE COLETA	COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA
N3_0074-A1		Coraloides no contato parede/ teto	Hematita	Fe_2O_3
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$

N3_0074-A2		Coraloide na parede	Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Quartzo	SiO_2
			Variscita	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
N3_0074-A3		Borda de "marmita" no piso	Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Quartzo	SiO_2
			Hematita	Fe_2O_3
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$(\text{Fe,Al})\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			Variscita	$\text{AlPO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$

6.2.4.2 Resultado da FRX

Nas três amostras (Tabela 10) da caverna N3-0074, tanto o pentóxido de fósforo como o óxido de ferro apresentam os mesmos percentuais, ambos com média 33%. Outros elementos também apresentam percentuais consideráveis, como o dióxido de silício 1,5% (SiO_2) 9% e óxido de alumínio (Al_2O_3) 7%. Os demais têm suas médias inferiores a 1%; o PF variou entre 15,6% e 18%.

Tabela 10: Resultado da FRX na caverna N3_0074

N3_0074	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	PF
A1	<0,001	3,88	2,47	31,4	0,388	0,371	0,092	43,1	18
A2	<0,001	10,2	15,4	33,4	0,053	0,073	0,052	24,9	15,5
A3	0,106	8,59	9,29	34,4	0,059	0,601	<0,001	30,8	15,6

6.2.5 Caverna S11D_0083

A caverna S11D_0083 localiza-se na Serra Sul, bloco "D", nas coordenadas UTM 574799 E/ 9292889 N, elevação 737m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 121,0m, desnível de 6,12m, área de 424,5m² e volume de 1.006,0m³.

Caverna com entrada voltada para SSW, localizada na alta vertente, na primeira ruptura da canga. A montante a vegetação é de campo rupestre ferruginoso. Já a jusante, possivelmente pela humidade local, a vegetação é distinta, ou seja, ocorre um capão de mata.

Formada por dois eixos, o principal para NNE e segundo para NW, com morfologia completamente distinta. No salão NW o piso é repleto de feições decorrentes de processos de corrosão e erosão e está a cerca de 3,5m acima dos demais setores da caverna. No segundo, o salão dos espeleotemas, é interligado por uma galeria com lâmina d'água de aproximadamente 30cm. O piso é plano e com pouco sedimento.

As paredes são irregulares e recobertas de crostas de diferentes cores. No salão dos espeleotemas predominam crosta marrom e escorrimentos associados a canalículos e/ou fraturamentos.

O piso ocorre em dois níveis (Figura 33). O salão de entrada e o salão dos espeleotemas o piso é relativamente plano. O salão NW apresenta piso em nível mais elevado, com evidentes processos de corrosão, incluindo buracos semicirculares fechados ou abertos por pequenos canais de escoamento de água e presença de guano. Nas paredes temos as caneluras. Um espesso depósito de guano fresco recobre o piso do setor NW, em alguns pontos seco e na parte rebaixada do piso se mistura com a água do pequeno lago existente. É também neste setor onde se concentra a colônia de morcego que habita a caverna. Ainda neste setor pode-se observar os principais processos hidrológicos, englobando surgências, gotejamentos e um pequeno lago. São águas de origem pluvial que infiltram pelo pouco espesso pacote rochoso. Ou seja, a caverna está conectada ao escoamento da vertente.

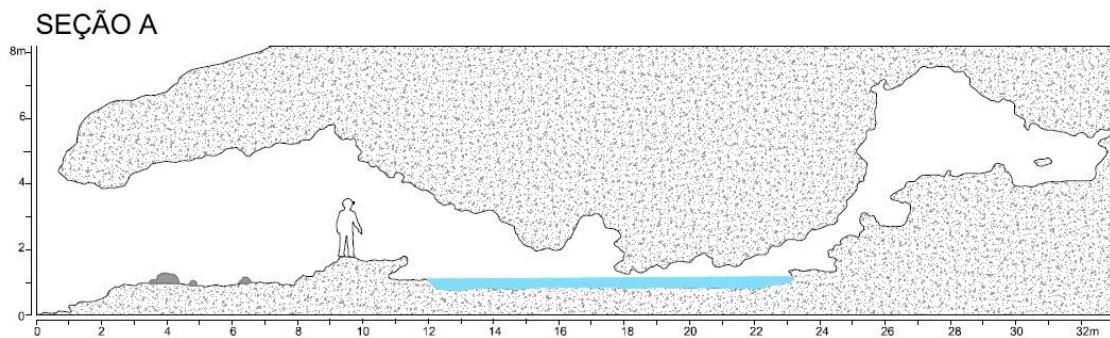


Figura 33: Perfil da caverna S11D_0083 indicando lâmina d'água e piso relativamente plano, sub-horizontal.

6.2.5.1 Espeleotemas

Foram coletadas quatro amostras (Figura 34) de espeleotemas: 1A) parafuso; 2A) estalactite com crosta; 3A) crosta acinzentada; 4A) estalactite;

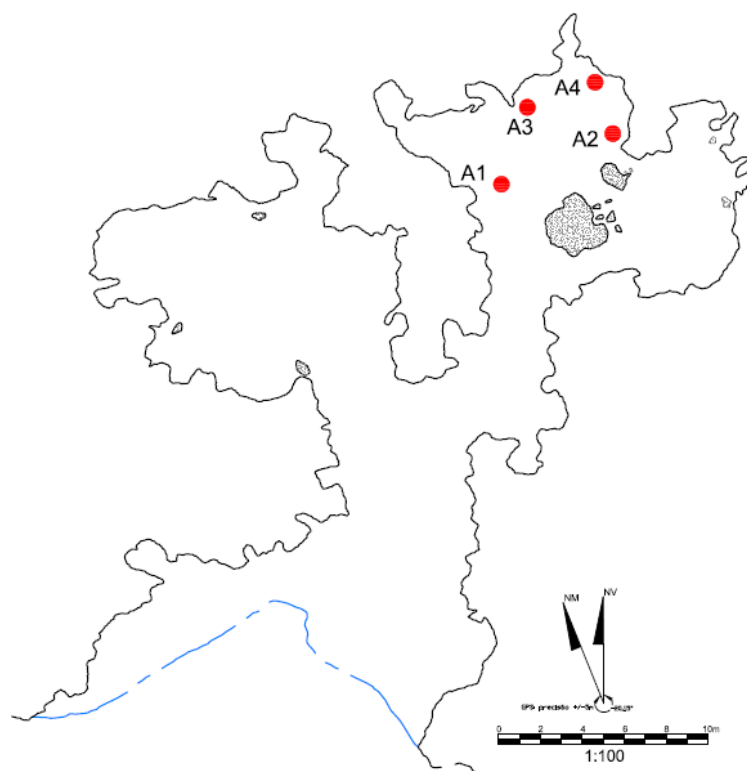


Figura 34: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.

O principal conjunto de espeleotemas (Figura 35) está concentrado no salão NE. Caverna menos expressiva do que algumas das cavernas amostradas, mas não menos importante. As estalactites estão em pequenos agrupamentos, isoladamente dispostas no teto.

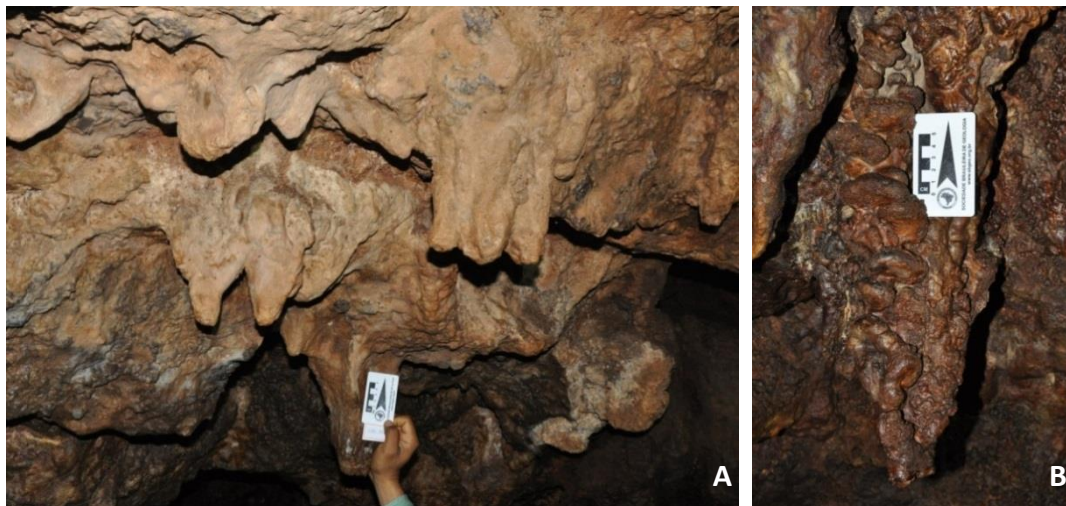






Figura 35: A) Conjunto de estalactites do salão NW; B) Estalactite recoberta por crostas.

6.2.5.2 Resultado das DRX

As quatro amostras foram submetidas à DRX. A tabela abaixo apresenta os resultados (Tabela 11).

Tabela 11: Resultado da DRX na caverna S11D_0083

Nº da Amostra	Amostras	ESPELEOTEMA - PONTO DE COLETA	Composto	Fórmula Química
S11D_0083 - A1		Estalactites em reentrância no teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$

			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
S11D_0083 - A2		Estalactite no teto	Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$
			Strengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
S11D_0083 - A3		Crosta sobre bloco na parede	Hematita	Fe_2O_3
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
S11D_0083 - A4		Estalactite no teto	Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Sfeniscidita	$\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$
			Fosfosiderita	$\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$

6.2.5.3 Resultado da FRX

Nas quatro amostras da caverna S11D-0083 (tabela 12) o óxido de ferro é o elemento dominante, atingindo valores com média de 46%, seguido por pentóxido de fósforo, com percentuais com média de 34%; conseqüentemente, os demais elementos apresentam valores baixos, que variam entre 1% e 1,5% (K₂O e Al₂O₃). O fator PF variou pouco, entre 14,1% e 21,1%.

Tabela 12: Resultado da FRX na caverna S11D_0083

S11D_0083	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	Fe₂O₃	PF
A1	0,079	2,3	0,775	37	0,089	0,785	<0,001	37,7	21,1
A2	0,088	1,36	0,165	37,6	0,035	0,782	<0,001	40	19,9
A3	0,092	1,7	0,912	23,7	0,087	2,67	<0,001	55,8	14,1
A4	0,08	0,524	0,482	37,4	0,046	0,351	<0,001	41,2	19,6

6.2.6 Caverna S11C_0041

A caverna S11C_0041 localiza-se na Serra Sul, bloco “C”, nas coordenadas UTM 568524 E/ 9294526 N, elevação 659m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 153,0m, desnível de 7,2m, área de 648,1m² e volume de 1.094,0m³.

Inserida na média vertente, ou seja, na borda do compartimento da cimeira, na margem esquerda de uma drenagem intermitente.

A canga detrítica é a litologia predominante, mas há ocorrência de jaspilito de forma subordinada. Predominam clastos do tamanho seixo, subangulares, caoticamente arranjados na matriz.

Composta por três entradas voltadas para “WSW”, sendo o desenvolvimento principal da caverna no sentido WNW/ ESE. Pode-se dividir em dois setores, o da entrada é formado por um amplo salão e piso relativamente plano. O segundo, acessado por uma galeria ampla com paredes irregulares e piso com lâmina d’água de aproximadamente 30cm (Figura 36).



Figura 36: Lâmina d'água nas proximidades da entrada que dá passagem para outros setores da caverna.

As paredes são irregulares, com aspecto esponjiforme, com irregularidades de corrosão e superfícies polidas. Também foi observado *boxwork* constituído por material ferruginoso.

Sob o ponto de vista hidrológico, destaque para duas poças perenes na caverna, sendo uma maior, nas proximidades da entrada, e outra no setor distal. Nessas poças há muito guano. Ocorrem também no piso canais de escoamento de águas infiltradas. No final da caverna ocorrem pelo menos três surgências, que direcionam o fluxo para a poça das proximidades do salão da entrada por meio de canais de escoamento. Um desses fluxos se aprofundou e formou um nível inferior raso. Marcas na parede indicam oscilação do nível do lago.

O teto é irregular, com algumas cúpulas, bolsões, com partes recobertas por crostas de diferentes tonalidades. Também apresenta processos de corrosão chegando a formar pequenas cúpulas (Figura 37).

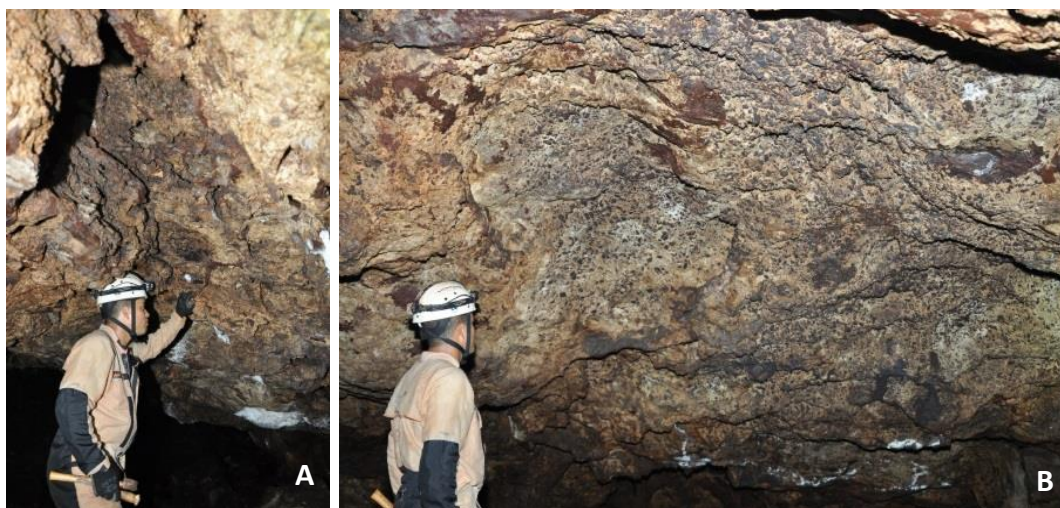


Figura 37: A) Bolsões no teto; B) Pequenas cúpulas.

No salão de entrada há sedimento argiloso, avermelhado, com matacões e seixos esparsos. Nos demais salões o sedimento é argiloso de cor marrom claro e pegajoso, ambos recoberto por uma camada de guano (Figura 38-A).

O piso tem aspecto ruiforme, irregular, com canais de escoamento concentrado, alguns com mais de 1m de profundidade. Ocorrem também buracos de corrosão semicirculares resultado do gotejamento, cobertos por guano (Figura 38 - B). Dois destes canais, os mais profundos, recebem água de canais menores e direcionam parte da água para o lago no salão de entrada e algumas poças próximas à parede (Figura 38: A, B, C e D).



Figura 38: A) Canal rochoso de escoamento concentrado; B) Espesso depósito de guano; D) Surgência no final do conduto; (C) Piso recoberto por guano e feições morfológicas associadas a processos de corrosão.

No segundo salão, onde além das características já mencionadas ocorre setores suspensos onde se observa concentração de fluxo hídrico através de canais de escoamento superficial concentrado. Os canalículos e as fraturas são os principais responsáveis pelo aporte de recuso hídrico à caverna.

A inclinação do piso, exceto o salão de entrada, é ascendente, ou seja, concordante com a vertente (Figura 39).

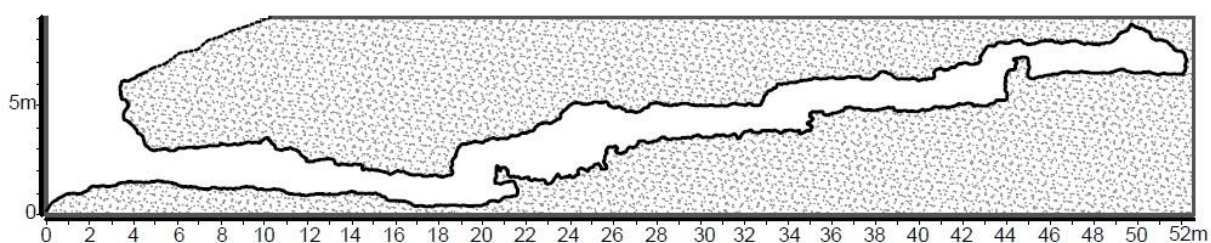


Figura 39: Perfil da caverna S11C_0041 indicando a concordância do piso com a vertente.

6.2.6.1 Espeleotemas

Foram coletadas sete amostras (figura 40) de espeleotemas: A1) microcortina; A2) crosta branca friável; A3) estalactite; A4) crosta marrom-acinzentada; A5) crosta laranja; A6) coraloide tipo *popcorn*; e A7) coraloide.

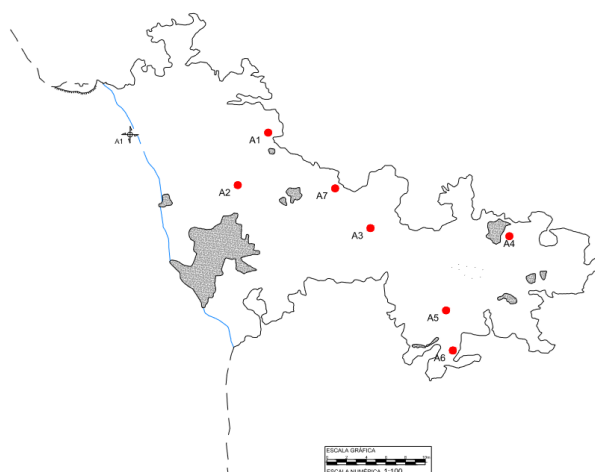


Figura 40: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.


No salão de entrada predominam crostas vermelhas e brancas. No teto e paredes da galeria que dá acesso aos demais setores da caverna predominam crostas amarelas, que recobrem praticamente todo teto. Nas paredes também é possível observar crostas marrons e cinzas. Merece destaque nichos de coralóides tipo parafuso e botrioidais. Esses coralóides também foram observados na caverna N4WS_0067 e S11D_0083. Além das estalactites analisadas foram observados dois estalactites centimétricos (+20 cm), que apresentam deposição concêntrica e canal. Faixas de crostas cinza predominam em uma faixa de contato entre o piso e a parede.






Pequenas concentrações de crosta laranja, amorfa (amostra S11C_0041_A5), foram observadas na faixa de contato entre o piso e parede. Esta depois de retirada mudou completamente de textura, tornando-se úmida e pegajosa.


6.2.6.2 Resultado das DRX

As sete amostras foram submetidas à DRX. Os resultados são apresentados abaixo (Tabela 13).

Tabela 13: Resultado da DRX na caverna S11C_0041

Nº da Amostra	Amostras	ESPELE TEMA - PONTO DE COLETA	Composto	Fórmula Química
S11C_0041 - A1		Cortiço na parede	Hematita	Fe_2O_3
			Leucofosfita	$\text{K}(\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})(\text{H}_2\text{O}))(\text{H}_2\text{O})$
			Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
			Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$

S11C_0041 - A2		Crosta no teto	Alunita	$K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6)$
S11C_0041 - A3		Estalactite no teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Sfeniscidita	$Fe_2(NH_4)(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$
S11C_0041 - A4		Crosta em patamar na parede	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Hematita	Fe_2O_3
S11C_0041 - A5		Crosta no contato do piso com a parede	Gipso	$Ca(SO_4)(H_2O)_2$
			Sulfato de cálcio hidratado	$Ca(SO_4)(H_2O)_{0,5}$
			Francoanellita	$K_3Al_5(HPO_4)_6(PO_4)_2(H_2O)_{12}$
S11C_0041 - A6		Coraloide na parede	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Sfeniscidita	$Fe_2(NH_4)(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$
			Hematita	Fe_2O_3
			Quartzo	SiO_2

S11C_0041 - A7		Coraloide no teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Sfeniscidita	$Fe_2(NH_4)(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$

6.2.6.3 Resultado da FRX

Nas sete amostras da caverna S11C-0041 (tabela 14) o óxido de ferro atingiu valores com média de 33%, seguido do pentóxido de fósforo, variando em aproximadamente 35%. Outros três elementos apresentaram valores menores, com médias variando entre 1% e 6% (CaO, SO₃ e Al₂O₃). Os demais ocorreram em porcentagens inferiores a 1%. Nas amostras desta caverna o fator PF variou em grandes proporções, precisamente entre 15,7% e 49,5%.

Tabela 14 Resultado da FRX na caverna S11C_0041.

S11C_0041	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PF
A1	0,555	2,15	0,958	22,2	0,889	1,22	0,836	52,2	17,7
A2	<0,001	23	0,322	3,19	16,5	6,52	0,261	0,57	49,5
A3	0,155	0,285	0,389	36,8	<0,001	0,315	0,081	41,4	20,1
A4	0,086	2,81	0,522	29,6	0,056	1,35	<0,001	48,7	15,7
A5	0,235	2,78	1,35	7,37	28,1	1,33	24,1	0,746	33,6
A6	0,298	0,667	0,588	34,9	0,03	0,519	0,069	43,5	19,2
A7	0,209	0,676	0,623	34,4	0,054	0,375	0,081	43,6	19,5

6.2.7 Caverna S11B_0094

A caverna S11B_0094 localiza-se no bloco “B” da Serra Sul, nas coordenadas UTM 567086 E/ 9298166 N, elevação 676m, fuso 22M e datum SAD-69. Apresenta projeção horizontal de 163,50m, 14,3m desnível, área de 1.120m² e volume de 1.826m³.

Caverna inserida na média vertente, borda do compartimento de cimeira, na ruptura entre a vegetação de campo rupestre ferruginoso e a floresta ombrófila densa e com pacote rochoso pouco exposto, de aproximadamente 4m.

A canga detrítica tipo clasto suportada, com pouca matriz é a litologia predominante. Predominam clastos do tamanho seixo, angulosos e de hematita caoticamente arranjados. A matriz tem coloração avermelhada e localmente amarelada, possivelmente goetita.

Tem apenas uma entrada voltada para Leste. O desenvolvimento principal da caverna é no sentido E/W. A caverna pode ser dividida em dois setores. O da entrada é formado por um amplo salão e piso relativamente plano. O segundo é acessado passando por um amontoado de blocos. Este concentra os depósitos químicos mais importantes da caverna como estalactites, estalagmites e colunas (figura 41).

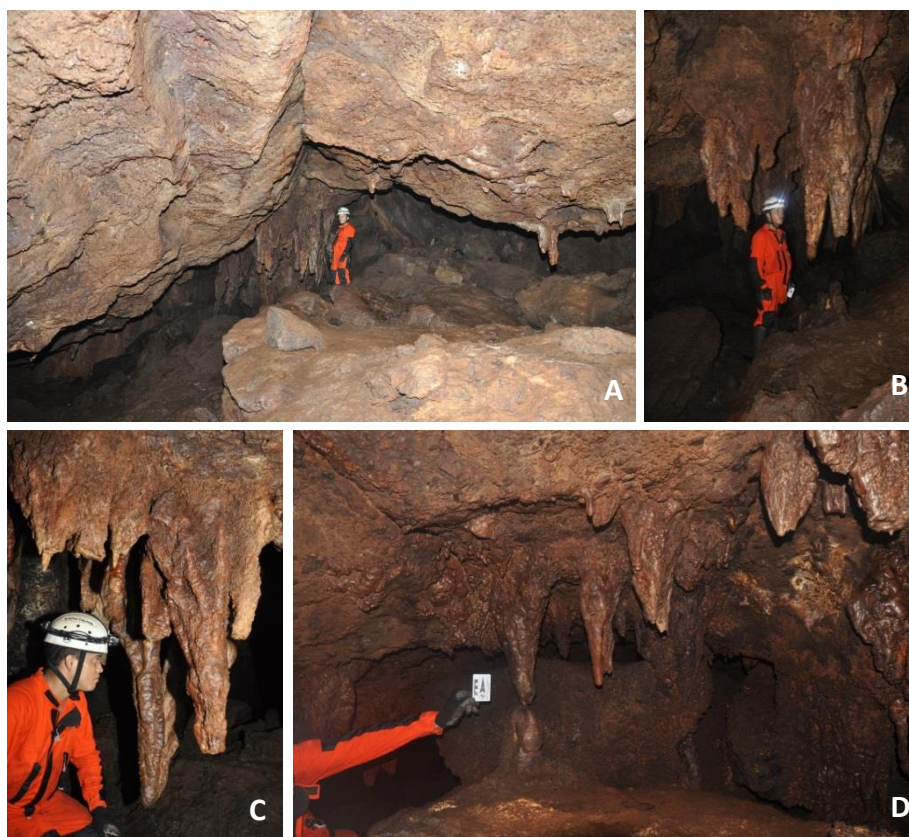


Figura 41: A) Conjunto de espeleotemas associados à fratura no teto; B) Concentrações de estalactites; C) Estalactites recobertas de crostas e “parafusos”; D) Coluna e estalactites próximos a trinca no teto.

No conjunto de espeleotemas desta caverna foi observado duas estalactites (figura 42) centimétricas (+-10 cm) que apresentam deposição concêntrica e canal. Por ter formação ainda menos recorrentes em cavernas ferríferas nenhuma amostra da estalactite foi coletada. No entanto, parte da crosta depositada abaixo do referido depósito foi analisada (amostra S11B_0094 - A4). O piso na entrada é relativamente plano, já nos demais setores é ascendente. No salão oeste, onde ocorrem os espeleotemas, o piso também é plano, com processos de corrosão formando canais de escoamento concentrado, buracos de corrosão, sulcos, poças; quase tudo recoberto de guano. Ainda neste salão há um desnível abrupto que divide o piso em dois níveis.

A colônia de morcegos é relativamente pequena e parte do guano está pastoso, mas presente em todos os setores. A maior concentração está na parede norte do salão dos espeleotemas. O guano recobre porções significativas do piso, algumas paredes, fundo das poças e buracos de corrosão (figura 42).



Figura 42: A) Guano recobrendo o piso; B) poças com guano; C) piso com bolsas de corrosão ocupadas por com água e guano; D) lago com água e guano.

No salão dos espeleotemas, o principal meio de aporte de recurso hídrico são as fraturas, estruturas marcantes neste salão. Estas formam poças que são drenadas para outros setores da caverna. No setor norte, próximo à entrada, calículos, fraturas e gotejamento são as principais fontes. Parte do recurso se converge no salão de entrada.

6.2.7.1 Espeleotemas

No conjunto de espeleotemas desta caverna foram observadas duas estalactites (figura 43) centimétricas (± 10 cm) que apresentam deposição concêntrica e canal. Por ter formação ainda menos recorrentes em cavernas ferríferas nenhuma amostra da estalactite foi coletada. No entanto, parte da crosta depositada abaixo do referido depósito foi analisada (amostra S11B_0094 - A4).



Figura 43: A) Escorrimentos e estalactites nas paredes; B) Estalactite com cristalização concêntrica.

Foram coletadas seis amostras (Figura 44) de espeleotemas: A1) parafuso; A2) estalactite; A3) estalagmite; A4) crosta marrom; A5) crosta sob estalactite – “Orelha”; A7) Crosta delgada.



Figura 44: Localização dos pontos de coleta dos espeleotemas.

Os depósitos mais significativos estão no salão NNW. Essas feições peculiares em tamanho e forma para cavernas em rochas ferríferas, como estalactites, estalagmites e colunas formam uma das cavernas mais importantes da região de Carajás.




O principal agrupamento está associado a estruturas como fraturas (Figura 44). Algumas medem, aproximadamente, 1m de diâmetro no topo e 2,5m de comprimento e estão ativas.




As crostas ferruginosas são delgadas com espessura milimétrica, em alguns pontos há sobreposição de crostas. Há uma diversidade de textura, cores e processos de sedimentação nas crostas.

6.2.7.2 Resultado das DRX

Seis amostras foram submetidas à DRX, as quais os resultados serão apresentados abaixo (tabela 15).

Tabela 15: Resultado da DRX na caverna S11B_0094

Nº da Amostra	Amostras	ESPELEO TEMA Ponto de coleta	Composto	Fórmula Química
S11B_0094 - A1		Coraloides no teto próximo de estalactites	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Quartzo	SiO_2
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
			Andalusita	$Al_2(SiO_4)O$
S11B_0094 - A2		Estalctite no teto	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
			Andalusita	$Al_2(SiO_4)O$
S11B_0094 - A3		Crosta no piso	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$

S11B_0094 - A4		Crosta na parede	Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Sfeniscidita	$Fe_2(NH_4)(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
			Fosfosiderita	$FePO_4(H_2O)_2$
S11B_0094 - A5		Crosta sobre estalactite	Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
			Fosfosiderita	$FePO_4(H_2O)_2$
			Leucofosfita	$KFe_2(OH)(PO_4)_2(H_2O)_2$
S11B_0094 - A7		Crosta no piso	Hematita	Fe_2O_3
			Leucofosfita	$K(Fe_2(PO_4)_2(OH)(H_2O))(H_2O)$
			Quartzo	SiO_2
			Strengita	$FePO_4 \cdot 2H_2O$
			Andalusita	$Al_2(SiO_4)O$

6.2.7.2 Resultado da FRX

Na tabela 16 é possível perceber que as seis amostras da caverna S11B-0094 o elemento dominante é o óxido de ferro (Fe_2O_3), o qual atinge valores com média de 42%. Outro componente que se destaca é o pentóxido de fósforo (P_2O_5), ocorrendo em média de 35%. Os demais elementos apresentam teores muito baixos com valores menores de 1%, com exceção do óxido de alumínio (Al_2O_3) que apresentou em média 1,5%, possivelmente em virtude da presença de minerais de argila. Nas amostras desta caverna o fator PF variou em pequenas proporções, entre 12,8% e 20,9%.

Tabela 16: Resultado da FRX na caverna S11B_0094

S11B_0094	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PF
A1	0,081	2,78	1,53	37,3	0,036	0,335	0,064	36,8	20,9
A2	0,148	1,81	0,325	37,7	0,032	0,394	0,051	38,9	20,5
A3	0,163	2,46	0,203	36,5	0,086	3,62	0,157	36,2	20
A4	<0,001	1,63	0,229	37,5	<0,001	0,255	<0,001	39,4	20,7
A5	<0,001	0,521	0,309	37,3	0,021	0,134	<0,001	41,1	20,4
A6	0,108	0,973	0,984	24	0,043	0,811	<0,001	59,7	12,8

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 OS LITOTIPOS DAS CAVERNAS

As sete cavernas estudadas estão no contato da canga clasto-suportada com a formação ferrífera. A rocha máfica não foi encontrada como único litotipo em nenhuma das cavernas amostradas, mas ocorre no contato com a canga, com o jaspilito ou com ambos.

Macambira & Schrank (2002), através da análise de 62 amostras de jaspilito na Serra Norte, revelaram teores médios de Fe₂O₃T= 53,65%; SiO₂= 44,60 %; Al₂O₃= 0,63%; FeO= 1,31%; MnO=0,06%; MgO= 0,1%; CaO= 0,04%; Na₂O= 0,04%; K₂O= 0,02%; P₂O₅= 0,01% e PF= 0,73%. Nota-se que o teor de fósforo é muito baixo no jaspilito.

Analisando valores médios (em porcentagem) de Fe₂O₃=84,82; SiO₂=0,78; Al₂O₃=5,8; P₂O₅=1,63; SO₃=0,12 de cinco amostras da matriz da canga que cimentavam clastos de hematita ou fragmentos de jaspilito coletadas em cavernas de S11D, Piló & Auler (2011) comentam que há aumento dos valores de alumínio em relação ao minério de ferro, assim como a presença do fósforo (inferior a 2%) e do enxofre (inferior a 1%). Na amostra da caverna S11D-13, o fósforo chegou a registrar 2,7%. Esses resultados indicam que a canga pode ser uma fonte de fósforo para a formação dos espeleotemas, mas uma contribuição limitada. Um ponto importante é que não há na bibliografia o registro da apatita (fonte de fósforo) de origem hidrotermal

nos jaspilitos da Serra dos Carajás, como já identificado nas formações ferríferas de Hamersley, na Austrália. Tudo indica que o guano é a principal fonte do fósforo dos espeleotemas.

7.2 A ESPELEOMETRIA DAS CAVERNAS

Os parâmetros espeleométricos (projeção horizontal, área e volume) das cavernas estudadas (Figura 45) serão apresentados a seguir.

A média da projeção horizontal das cavernas é 190,18m, com valor máximo e mínimo de 283,0m e 121,0m, respectivamente. O desnível médio é de 12,28m, com valor máximo de 16,9m e mínimo de 6,10m. O volume médio é de 1.397m³, com valor máximo de 2.138m³ e mínimo de 878,0m³.

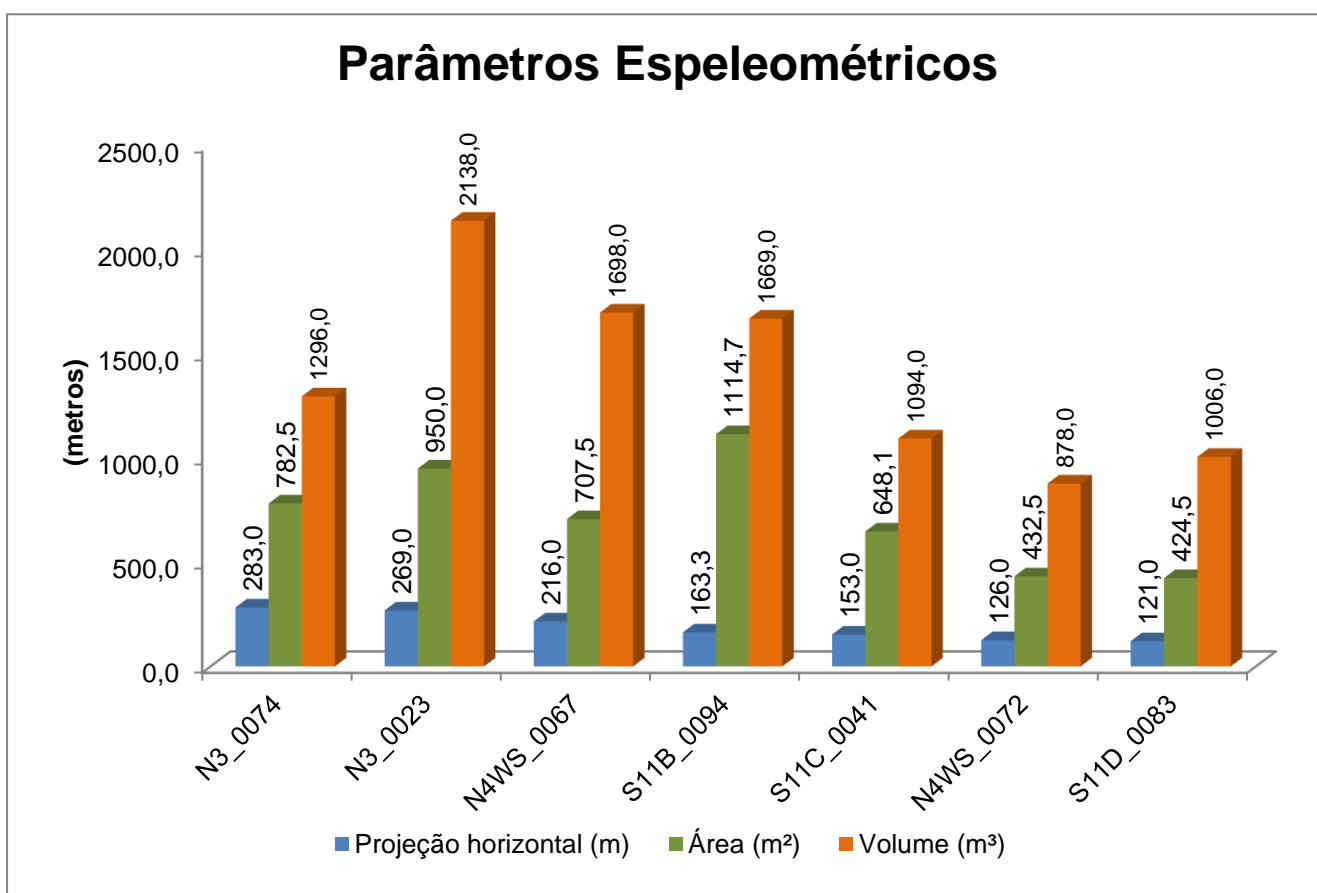


Figura 45: Parâmetros espeleométricos das cavernas estudadas

Os dados de desnível (Figura 46) também apresentaram grande variação. A caverna N4WS_0072, com 16,9m, é a que apresenta o maior desnível. A S11D_0083 foi a que teve o menor entre elas, 6,1m. A média da amostra é de 12,28m.

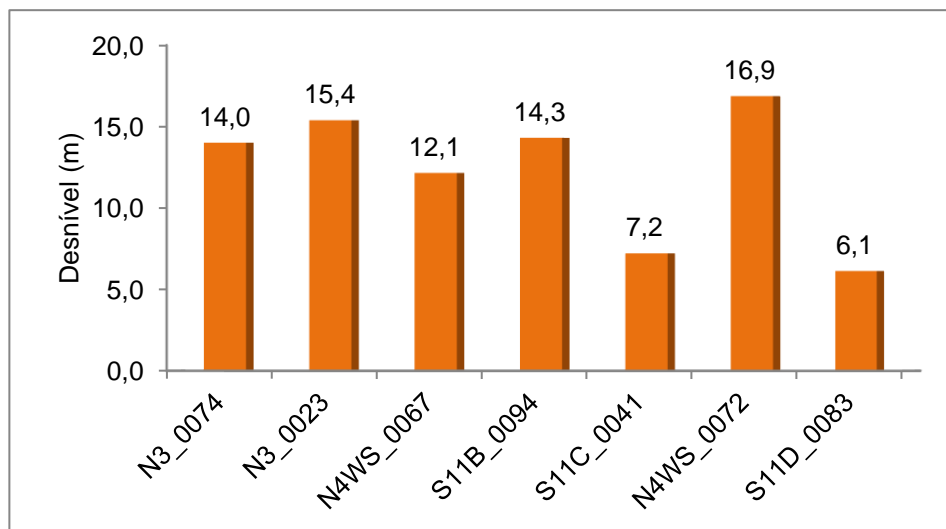


Figura 46: Desnível das cavernas estudadas.

Foi possível constatar que as cavernas selecionadas são constituídas por expressivos valores dimensionais, isto é, são grandes cavernas bem acima da média das cavernas de Carajás. Todas as cavernas são superiores a 120 m de projeção horizontal (PH) e acima de 800 m³ de volume. A média da PH é superior a 190 m.

7.3 O PADRÃO PLANIMÉTRICO E MORFOLÓGICO

Foram analisadas sete plantas baixa (Figura 47) das cavernas em questão, que possibilitaram a identificação de apenas um tipo: câmaras compostas constituídas por mais de um compartimento. Planimetricamente as cavernas se enquadram em dois padrões, o primeiro retilíneo (N4WS_0072) e esponjiforme (N3_0023, N3_0074, N4WS_0067, S11D_0083, S11C_0041 e S11B_0094).

Predominam cavernas muito irregulares, normalmente com dois níveis principais. O padrão esponjiforme é dominante, gerando câmaras com certo confinamento nos setores finais das cavernas. São cavernas que apresentam pisos concordantes com a inclinação da vertente, indicando uma conexão da caverna com o escoamento pluvial da encosta.

intermitente	NÃO	não foram avaliadas nesta caverna.	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Autóctone	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Escorrimento	SIM		SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM
Origem da água	canalículo e junta		canalículo e junta	canalículo e junta	canalículo e junta	canalículo e junta	canalículo e junta
Cor da drenagem	Cristalina		Cristalina	Cristalina		Cristalina	Cristalina
Surgência	SIM		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Nas cavernas S11C_0041, N3_0023 e S11D_0083 foi observado variação do nível das águas subterrâneas vadosas (Figura 48). A deposição de fosfatos em diferentes setores das paredes pode estar relacionada ao evento citado, que retira o guano depositado geralmente do piso, e o dispersa em partes da parede, pisos mais elevados e em alguns casos no teto. Eventos semelhantes foram observados em outras cavernas de Carajás. Associado ao mesmo processo foi observado surgimento de crostas brancas e crosta laranja amorfa. Essa última foi umas das amostras (N3_0023-A2 e A5) que gerou nova ocorrência de fosfatos em cavernas, a Francoanellita.

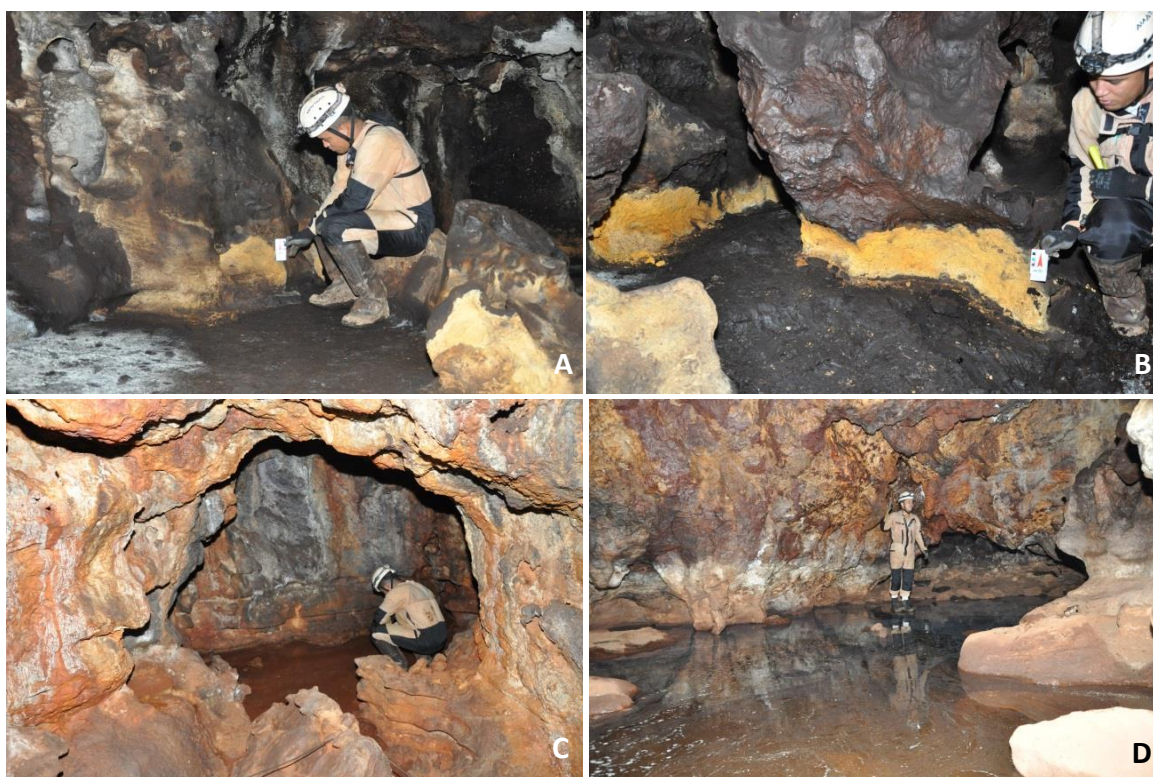


Figura 48: A/B) Crosta laranja no contato piso com guano e parede na caverna N3_0023; C) Lago reliquiar na caverna N4WS_0067 que teve a parede erodida. D) Variação do nível d'água, sazonal, marcado por crostas brancas nas paredes da caverna S11C-0041

Foram coletados dados de pH (Tabela 20) em 5 de poças que continham guano (tabela 20) na caverna S11B_0094. O pH médio é de 3,59, ou seja, extremamente ácido.

Tabela 20: Dados de pH e condutividade elétrica (μS).

Amostras	pH	μS
S11B_0094_P1	4,0	60
S11B_0094_P2	3,45	273
S11B_0094_P3	3,78	95
S11B_0094_P4	3,55	968
S11B_0094_P5	3,17	1560
S11D_0083_P1	3,62	609
S11D_0083_P2	3,68	3999*

*Essa medida foi repetida 3 vezes e sempre chegou ao limite de medição do equipamento.

Parker, et al. (2014) também registrou na caverna N4WS_0067 em uma poça com guano um pH de 2,11, ou seja, muito ácido. Nessa mesma poça também foi registrada uma grande quantidade de ferro na forma solúvel.

Os principais mecanismos de aporte hidrológico observados nas cavernas estudados são canalículos, gotejamento, fraturas e, especificamente na caverna N4WS_0072, uma claraboia no último salão que também é onde se localizam o principal agrupamento de espeleotemas.

Analisando a inserção na paisagem e algumas feições do entorno, na tentativa de investigar fatores que contribuíram para que essas cavernas se tornassem distintas da amostra regional, percebeu-se que algumas estão em cotas altimétricas inferiores a de lagoas e/ou áreas brejadas próximas e que sua projeção horizontal está relativamente alinhada na direção das lagoas. No entanto, nenhum estudo estrutural foi realizado para averiguar se há ou não uma relação estrutural. Porém, é conhecido que o processo de infiltração na canga, principalmente por águas pluviais, é preferencialmente vertical.

Todas cavernas apresentaram canais de drenagem de água pluvial infiltrada perenes ou temporários. Essas cavernas participam do escoamento subsuperficial das encostas. Essas drenagens podem ter trazido umidade para os morcegos (micro-ambiente quente, úmido e estável).

7.6 SEDIMENTOS ORGÂNICOS

Em todas as cavernas analisadas foi constatada a presença de guano (Tabela 21). Ocorre guano nas drenagens que formam os canais na rocha, assim como no interior das poças e paredes. O que os difere são a quantidade, estado do depósito (seco, úmido, decomposto ou enrijecido) e tamanho da colônia de morcegos atual. Também foi observado um aparente processo de enrijecimento do guano na caverna N3_0023. A sazonalidade da região Amazônica, com período bem definidos de chuva e seca, hidratando e ressecando o depósito pode ser um dos fatores que esteja contribuindo.

O guano decomposto gera soluções aquosas extremamente ácidas formando feições morfológicas de corrosão como também libera (solubiliza) fósforo e ferro para a formação dos espeleotemas raros. Em algumas cavernas os depósitos de guano não são compatíveis com o tamanho atual das colônias de morcegos, o que pode significar sucessivos ciclos de ocupação da mesma caverna. Os processos que formam esses espeleotemas e essas feições raras são biogênicos. O guano também tem uma importância indireta na espeleogênese dessas cavernas ferruginosas, pois as soluções ácidas biogênicas dissolvem a rocha ferruginosa, ampliando pisos e paredes.

Tabela 21: Análise da ocorrência do guano nas cavernas amostradas

Caverna	DEPOSITOS ORGÂNICOS (Guano)					
	Guano úmido	Guano Seco	Guano na drenagem	Espessura estimada do depósito de guano	Outros tipos de fezes	Guano nas Paredes
N3_0023	SIM	SIM	SIM	~15cm	NÃO	SIM
N3_0074	NÃO	SIM	SIM	<3cm	NÃO	SIM

S11B_0094	SIM	NÃO	SIM	<5cm	NÃO	SIM
N4WS_0067	SIM	NÃO	SIM	~10cm	NÃO	SIM
N4WS_0072	NÃO	SIM	SIM	~10cm	NÃO	SIM
S11D_0083	SIM	SIM	SIM	~10cm	NÃO	SIM
S11C_0041	SIM	SIM	SIM	~15cm	NÃO	SIM

Importante destacar que as medidas foram feitas nos locais de maior deposição, geralmente nas partes mais rebaixadas das cavernas. Pode-se observar que o guano está sendo transportado para outros setores como mudança do agrupamento da colônia de morcegos, pela oscilação do nível d'água e por águas de percolação (drenagens e escoamento superficial, principalmente no período chuvoso).

Outros sedimentos orgânicos, como folhiço, raízes e fezes de outros animais estão concentrados nas entradas das cavernas ou abaixo de claraboias, a exemplo da N4WS_0072.

7.7 MINERALOGIA DOS ESPELEOTEMAS

A quantidade de amostras coletadas por cavernas levou em consideração a diversidade de espeleotemas que indicassem presença de fosfatos, por isso, não há uma regularidade quantitativa no número de amostras, prevalecendo às cavernas N3-0023 e S11D-0083 com sete amostras e mínimo de três amostras nas cavernas N3-0074 e N4W-0072.

A diversidade tipológica dos espeleotemas é expressiva, predominando coraloides, crostas sobre pisos, sobre blocos, paredes e teto e escorrimentos. No entanto, o foco da pesquisa são os fosfatos.

Na Tabela 22 será apresentada uma correlação com base nos minerais descritos por Hill & Fort (1986) e os encontrados nesta pesquisa.

Tabela 22: minerais fosfáticos registrados em cavernas do mundo x minerais encontrados no presente estudo.

Minerais fosfáticos registrados em cavernas*	Fosfatos encontrados nas cavernas analisadas
Brushita	
Eosforita	
Ferrowillieita	
Fluorapatita	
fosfoferrita	
Fosfosiderita	Fosfosiderita
Hannaiyta	
Hureaulita	
Leucofosfita	Leucofosfita
Monetita	Monetita
Nissonita	
Rodolicoita	
Sfeniscidita	Sfeniscidita
Strengita	Strengita
Taranakita	
Variscita	Variscita
Vashegyita	
NOVA OCORRÊNCIA	Francoanellita
NOVA OCORRÊNCIA	Newberyita

*Fonte: Hill & Fort (1986).

Quanto à mineralogia dos espeleotemas foi possível registrar expressiva diversidade de 17 minerais, abrangendo óxidos-hidróxidos, fosfatos, sulfatos e silicatos. É possível perceber que os fosfatos são os elementos predominantes (Figura 49), ocorrendo em proporções consideráveis em todas as amostras analisadas. Esta classe de minerais inclui compostos em que íons ou cátions são combinados com oxigênio. Em alguns casos, o hidrogênio corresponde ao cátion, presente tanto como hidroxila ou água de hidratação.

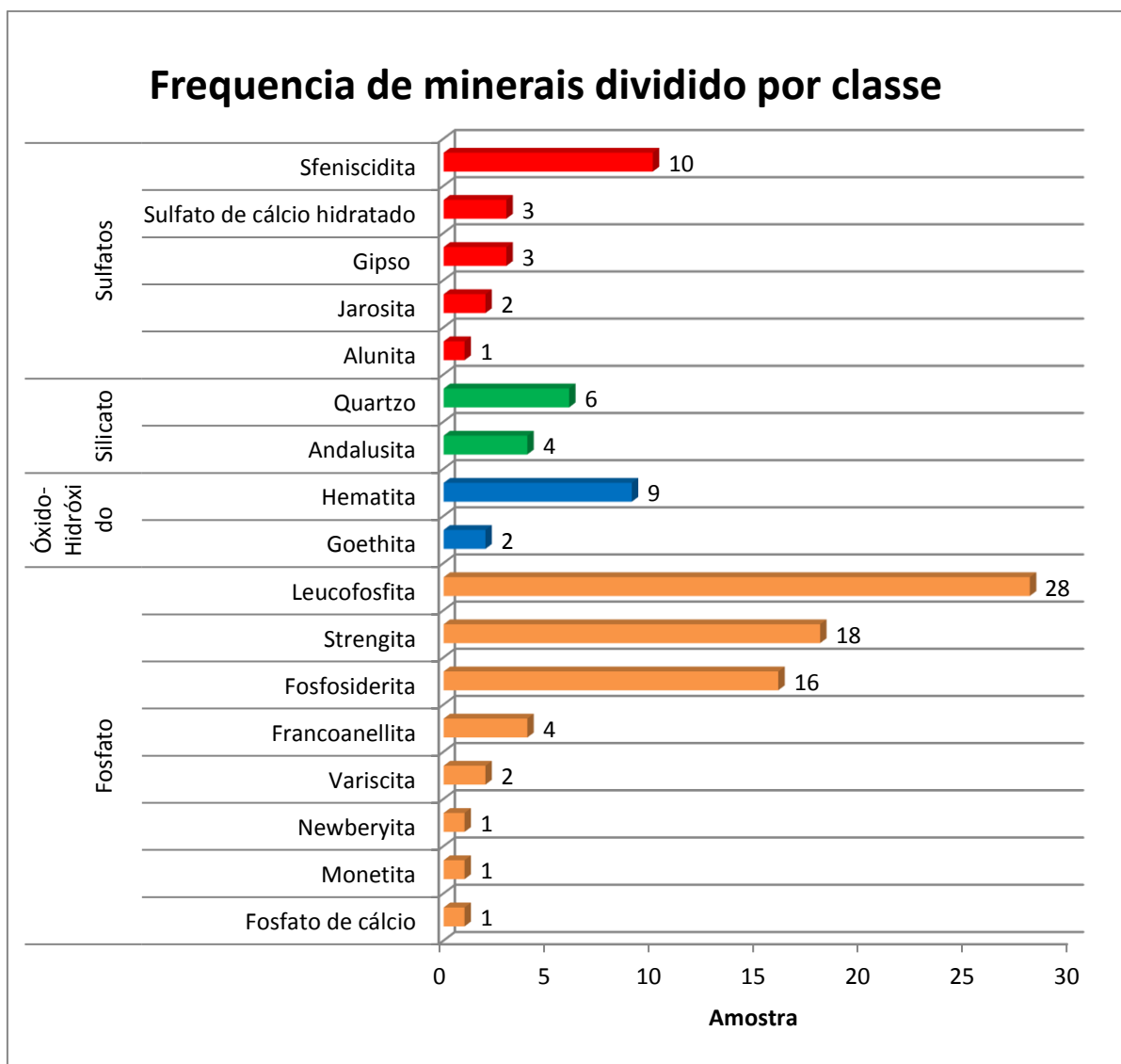


Figura 49: Frequência de minerais divididos por classe.

O mineral Leucofosfita ocorreu em 28 das amostras analisadas, seguido da Strengita 18, Fosfosiderita 16 e Sfeniscidita 10; os demais ocorreram em menor quantidade. No que tange a composição química, todas as amostras apresentaram similaridade, mesmo entre cavernas diferentes, com algumas poucas exceções, tais como, o mineral (ZrO_2 e NiO) que ocorreram nas cavernas S11D-0083 e S11C-0041. É importante ressaltar que as análises da composição química das amostras indicou a ocorrência de outros elementos (Na_2O , Cl , TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO , NiO , CuO , ZnO , SrO , BaO , ZrO_2) que não foram inseridos nas tabelas e discussões acima, por apresentarem valores inferiores a 0,001%.

Tendo como base as tabelas de percentuais das composições químicas das amostras apresentadas, verifica-se, a predominância do óxido de ferro, seguido do pentóxido de fósforo, na maior parte das amostras. Na verdade, apenas na caverna (N3-0023) o pentóxido de fósforo se apresenta como elemento dominante e na N3-0074, ambos, apresentam os mesmos percentuais. Isso demonstra que a combinação química mais expressiva do fosfato é com o ferro.

As amostras apresentam uma grande variação em relação ao PF, variando entre 15,5% e 49,5, porém, se considerarmos todas as amostras das cavernas, a média fica aproximadamente em 20%. Estes níveis de PF indicam que as amostras contêm certa humidade.

Na Figura 50 são apresentadas as porcentagens dos elementos registrados nas amostras.

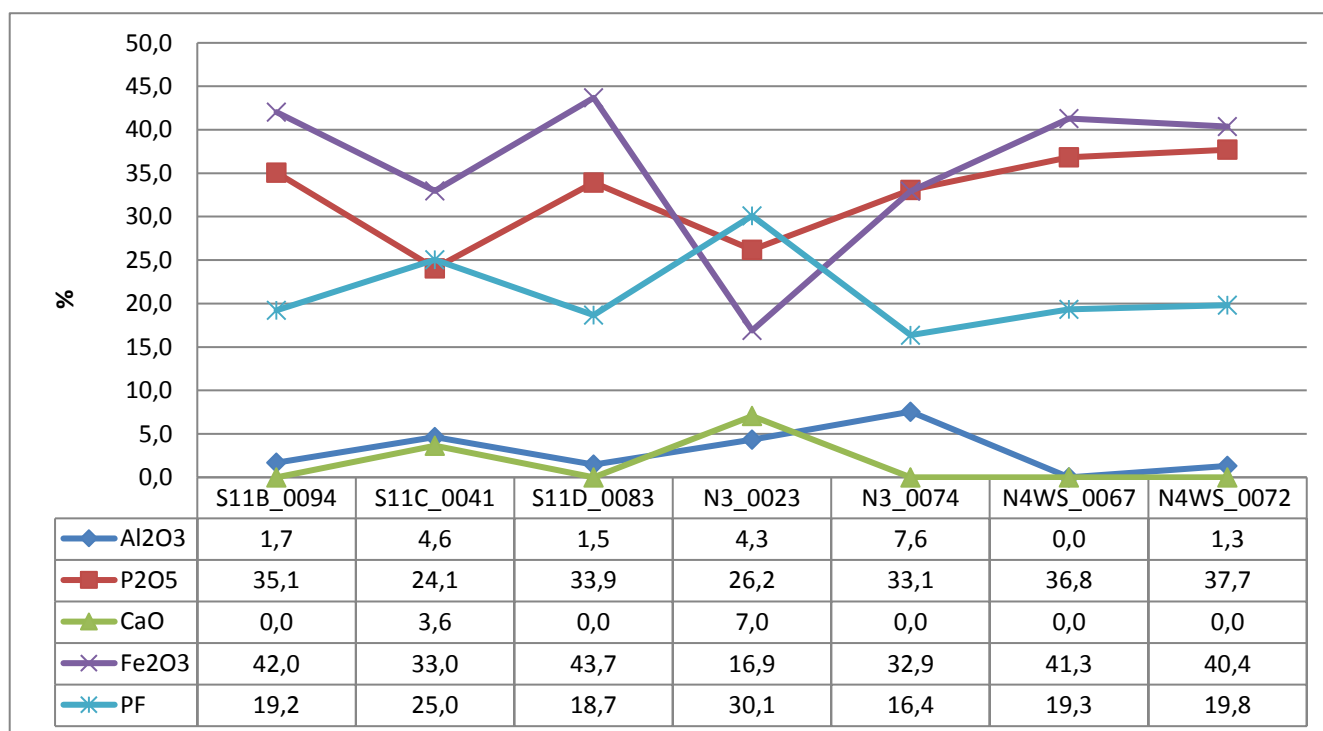


Figura 50: Média dos principais elementos encontrados nas amostras.

7.7.1 Óxidos-hidróxidos

Minerais de óxidos de ferro podem surgir em cavernas a partir de gotejamento e de escorrimento de produtos de intemperismo de sulfetos (ex. pirita) ou como

depósito argiloso secundário. Ferrobactérias geralmente participam da deposição dos minerais de óxido de ferro.

Foram registrados apenas dois minerais pertencentes a essa classe: goethita e hematita (Figura 51). Esses minerais foram observados em 10 amostras, o que corresponde a 27,7% das amostras coletadas, sendo que em muitas delas foi observado mais de um tipo de óxido-hidróxido.

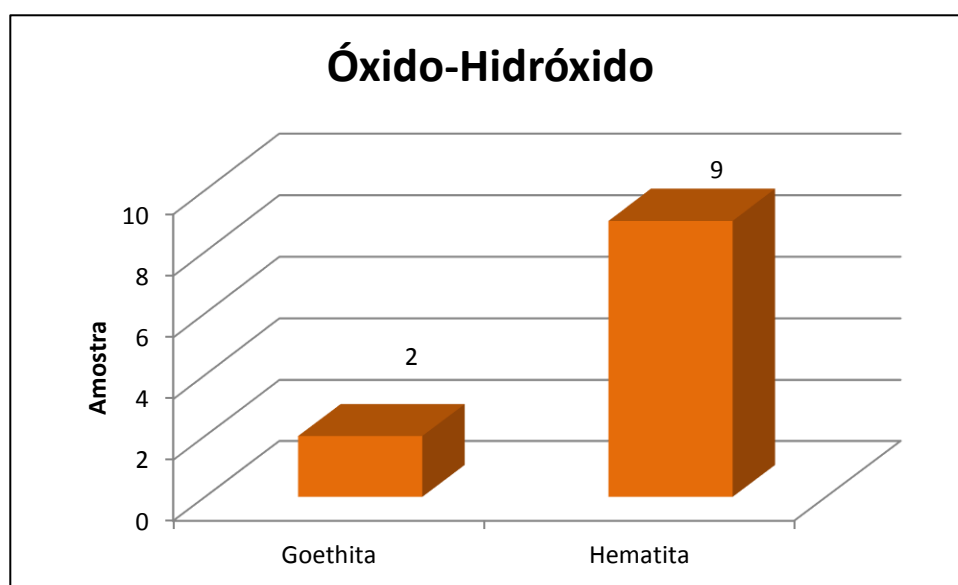


Figura 51 Frequência dos óxidos-hidróxidos

O mais frequente foi o mineral hematita (Fe_2O_3), detectado em nove amostras, representando 25% do total. A ocorrência de hematita em cavernas muitas vezes é atribuída a atividades hidrotermais, o que não é caso de Carajás. Martini (1993) sugere que espeleotemas ativos de óxido de ferro são compostos de goethita, mas quando inativos tornam-se friáveis e tendem a se transformar em hematita.

A hematita pode estar associada aos minerais fosfáticos ou aos sulfatos. Quanto aos óxidos, a hematita geralmente está associada ao óxido de ferro hidratado goethita - $\text{FeO}(\text{OH})$ -, que foi detectado em apenas 2 amostras (5,5%). A goethita é um mineral comum nas cavernas, já registrada em várias partes do mundo. Segundo Hill & Forti (1997), limonita e goethita são transportados em suspensão como colóides ou como partículas muito finas. Esses podem precipitar para formar escorrimentos e coralóides.

7.7.2 Fosfatos

Nos espeleotemas amostrados foram registrados oito minerais fosfáticos: fosfato de cálcio, monetita, newberyita, variscita, francoanellita, fosfosiderita, strengita e leucofosfita (Figura 52). Esses minerais foram observados nas 36 amostras, que corresponde a 100%, sendo que em muitas delas foram observados mais de um tipo de mineral fosfático.

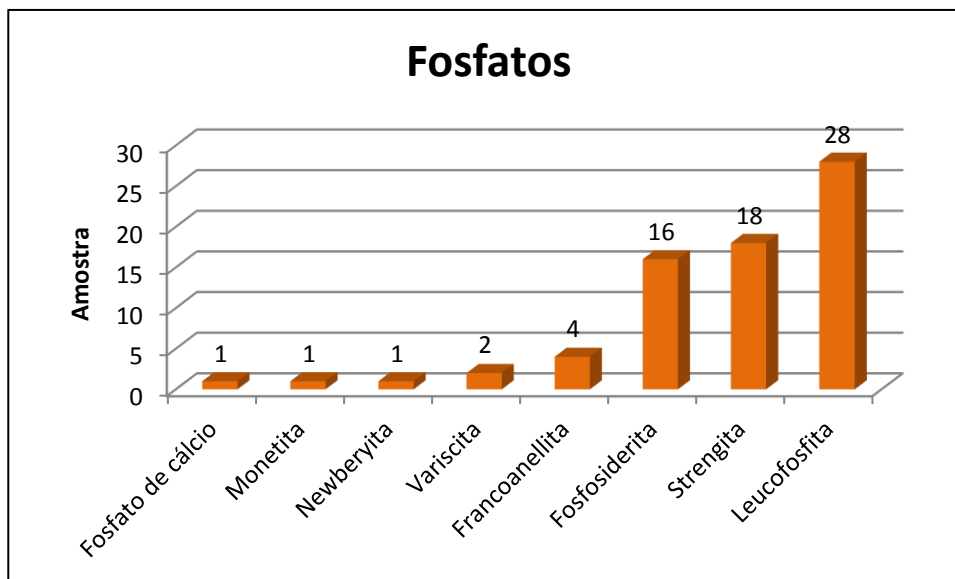


Figura 52 Frequência dos fosfatos nas amostras

Os minerais leucofosfita, fosfosiderita e strengita foram os de maior recorrência, detectados em 33 amostras, ou seja, 91% do total. A strengita e a fosfosiderita ocorrem na maior parte das vezes associadas. A leucofosfita apesar de ocorrer em conjunto com a strengita e a fosfosiderita, também ocorre em várias amostras, associada a todos os tipos de espeleotemas onde houve coleta.

O mineral **leucofosfita** – $\text{KFe}_2(\text{PO}_4)_2\text{OH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – mineral com maior abundância entre as amostras, ocorrendo em 28, equivalente a 78% é originado quando um íon potássio e o ferro estão presentes na solução. Esse mineral já foi registrado em várias cavernas do mundo, incluindo Austrália, Malásia, Itália, África do Sul, Venezuela e Brasil. Em Culones de Caoma, na Venezuela, o mineral foi registrado em coraloides associado à opala.

A **strengita** – $(\text{Fe},\text{Al})\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ocorre em 18 amostras (50%) e foi identificada em cavernas de minério de ferro na Serra dos Carajás por Maurity &

Kotschoubey (1995). Também já foi identificada em áreas de minério de ferro nos Montes Bomi na Libéria. Nesse local, é derivada pela ação de guano de morcego na rocha encaixante. A strengita, na amostra estudada, sempre está associada a outros minerais fosfáticos e, mais raramente, aos sulfatos. Esse mineral foi identificado por Piló & Auler (2007) em outras cavernas também alojadas no Quadrilátero Ferrífero.

A **fosfosiderita – $\text{FePO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$** – está presente em 16 amostras (44%); é um dimórfico com a strengita. Já foi identificada associada à strengita e à leucofosfita na caverna Bomi Hill, na Libéria, assim como em cavernas na Papua Nova Guiné e na África do Sul. Na África, o mineral encontra-se associado ao guano (HILL & FORTI, 1997). A fosfosiderita foi registrada por Maurity & Kotschoubey (1995) em cavernas de N1 em Carajás, formando revestimentos de pisos e de blocos.

O fosfato de alumínio denominado **variscita - $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$** - foi registrado nas amostras A2 e A3 da caverna N3-0074 e representa 5% do total, presente em um coralóide e uma crosta. É relativamente comum dentro de cavernas, tendo sido descrito sob forma de crostas e escorrimentos (HILL & FORTI, 1997). Foi registrada em apenas duas cavernas na área de estudo. De acordo com a bibliografia consultada, a variscita foi descrita para espeleotemas em cavernas siliciclásticas da Chapada Diamantina (WIEGAND et al., 2004), em caverna de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (PILÓ & AULER, 2007) e Carajás (PILÓ & AULER, 2011). Variscita faz parte do numeroso grupo de minerais fosfáticos em cavernas que tem sua origem a partir de depósitos de guano. O fósforo é derivado do guano de morcego, ao passo que o alumínio, tem sua origem na rocha.

O **monetita - $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Ca}(\text{HPO}_4)$** - foi identificado apenas na amostra A4 da caverna N3-0023, em uma crosta.

O **Fosfato de cálcio - $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$** – foi encontrado apenas na caverna na mostra A4 da caverna N4WS-0067, em um colaróide tipo “parafuso”.

O **francoanellita - $\text{K}_3\text{Al}_5(\text{HPO}_4)_6(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$** - descoberto em uma caverna, em Apulia na Itália pelo espeleólogo italiano Franco Anelli. Trata-se de um fosfato hidratado que continha alumínio, ferro, potássio e sódio, com coloração branca amarelada e dureza variando entre 1 a 2 na escala de Mohs. Este mineral ocorreu em quatro amostras, sendo três na caverna N3-0023 (A2, A3 e A5) e 01 na caverna S11C-0041 (amostra A5), todos em crosta.

Foi encontrado três referências deste mineral, sendo um na Austrália, Korea e Itália. Na América foi a primeira ocorrência.

O **newberyita - $Mg(HPO_4)3H_2O$** – Foi nomeado por Gustav vom Rath em 1879 em homenagem a James Cosmo Newbery em 28 de junho de 1843 em Leghorn (Livorno), Itália. Agregado de cristais lenticulares a Newberyita é raro fosfato de Mg que foi detectado pela primeira vez em uma caverna vulcânica da Austrália, *Skipton Cave*. A origem desta mineralização é atribuída à depósitos de guano de morcegos que habitavam esta caverna.

Os cristais Newberyita de *Skipton Cave* mostraram três hábitos diferentes: a) são tabulares, translúcidos a opacos e cinza-amarronzado, com faces da forma dominante desigual e sem brilho.

Acredita-se que os moradores foram informados sobre a existência da caverna por povos aborígenes em 1839. O primeiro relatório escrito, em 1843, declarou que as cavernas eram um local de poleiro (criação de galinhas) e reprodução para morcegos. O relato menciona que "há grandes montes de tipo escuro de excrementos, elevando-se em cinco colunas, 10 ou 12 pés de altura, que se diz ser esterco de morcego, que continha partículas brilhantes".

A Newberyita já ocorreu na Ásia, América do Norte, Europa, África, entre outros países. Na América do Sul é a segunda ocorrência em cavernas, a primeira foi registrada no Chile.

7.7.3 Silicatos

Minerais de silicato são formados por SiO_4 e podem se associar a um ou mais átomos de oxigênio, formando estruturas maiores com elementos metálicos. Embora os silicatos correspondam a mais de 95% dos minerais da crosta terrestre, em cavernas não são abundantes. Os minerais argilosos são silicatos hidratados de alumínio, magnésio, sódio e cálcio que possuem estruturas em camadas. Vários minerais argilosos têm sido registrados em cavernas, mas a maioria tem origem externa (ocorrência residual), não sendo formada no interior da caverna.

Os minerais silicáticos foram registrados em sete amostras (19%), sendo identificados dois minerais (Figura 53).

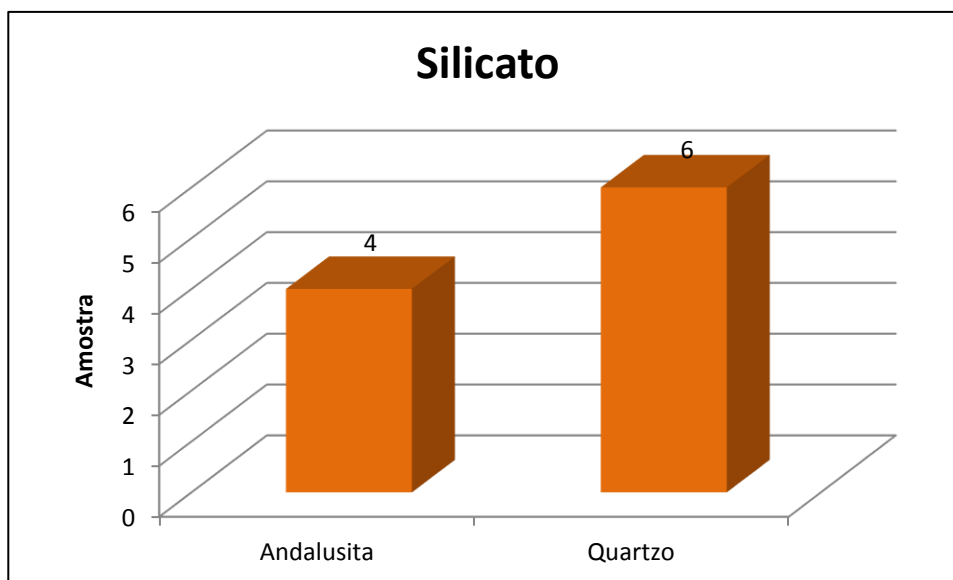


Figura 53 Frequencia dos silicatos nas amostras

A **andaluzita – $Al_2(SiO_4)O$** – foi identificada em quatro amostras de crostas (11%) em sua maior parte associada ao quartzo. Ocorreram em crosta, coraloídes e estalactites. Já tinha sido registrada em análises químicas de uma caverna na Serra Sul de Carajás, em 2011 por Auler & Piló. A andaluzita é um dos constituintes dos três polimorfos de $Al_2(SiO_5)$, os quais são: cianita, andaluzita e sillimanita. Os três minerais são encontrados em rochas aluminosas metamorfizadas. Tais rochas tendem a formar sillimanitas em áreas de alta temperatura e regionalmente metamorfizadas. Andaluzita é encontrada em regiões de metamorfismo de contato, associada a fluidos hidrotermais de alta temperatura. A cianita é encontrada em áreas de metamorfismo de alta pressão. Desta forma, a presença de andaluzita só pode ser explicada pela percolação de fluidos termais na área onde se situa a caverna.

O **quartzo – SiO_2** - foi identificado em seis amostras (16%), com origem muito provavelmente residual. Foi registrado apenas em crostas e colaróides.

7.7.4 Sulfatos

Os sulfatos apresentam - $(SO_4)_2$ - originando-se devido à ocorrência de íons de sulfato em águas subterrâneas e a alta reatividade desse íon-. Os sulfatos ocorreram em 16 amostras (44%). Foram detectados em cinco minerais (Figura 54).

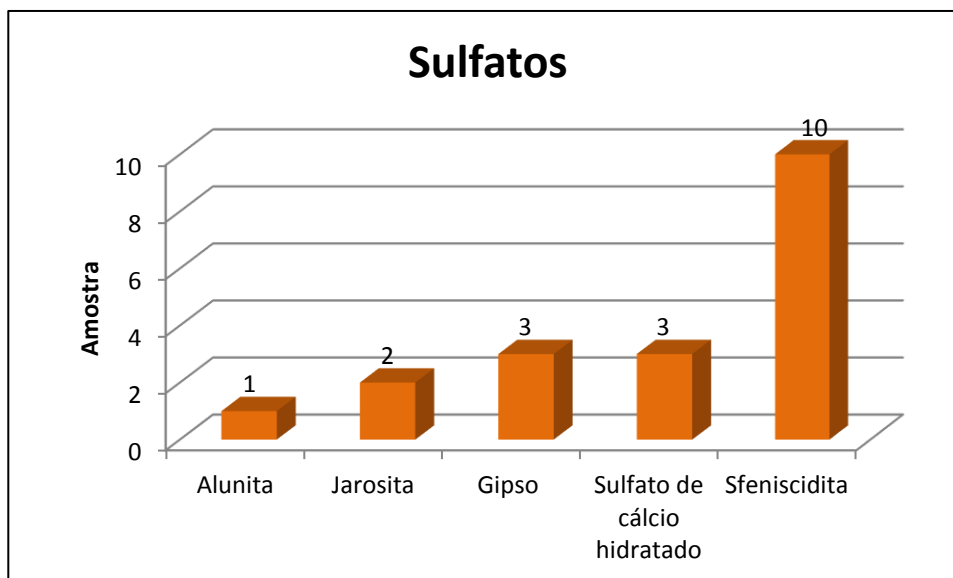


Figura 54 Frequência dos sulfatos nas amostras

Cinco fontes para a ocorrência de sulfatos em solução têm sido propostas: oxidação de sulfetos; rocha de sulfato; rocha basáltica; fumarolas ativas e guano de morcego. As reações químicas envolvendo sulfatos são complexas. Muitas delas ainda não são totalmente compreendidas. Alguns mecanismos, no entanto, têm sido propostos para a deposição de sulfatos como a precipitação por evaporação, substituição-solução e efeito do íon comum e água saturada (HILL & FORTI, 1997).

O **sfeniscidita - $\text{Fe}_2(\text{NH}_4)(\text{OH})(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_2$** - mineral com maior abundância entre os sulfatos, foi identificado em 10 amostras (28%) em seis cavernas, em sua maioria associado a leucofosfita e fosfociderita e foi encontrada em crosta, coralóide e estalactite.

O **sulfato de cálcio hidratado - $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$** - foi identificado em três amostras coletadas em crosta, sendo duas (A2 e A5) na caverna N3-0023 e uma na S11C-0041-A5, ambas em crosta laranja amorfa no contato da parede com o piso recoberto por guano. Em todas associadas com o gipso e o francoanellita.

O **Gipso - $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$** - também foi identificado nas mesmas 3 amostras (N3_0023- A2/A5 e S11C-0041-A5) onde ocorreu o sulfato de cálcio hidratado, juntamente com o francoanellita.

O mineral **jarosita - $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$** - foi registrado em duas cavernas, num total de duas amostras, representando 5% das amostras analisadas e foram coletados

em crosta e coralóide, ambas associadas à hematita. É encontrado na região de Carajás e no Quadrilátero Ferrífero em crostas e coraloides, associados à hematita e por vezes aos fosfatos.

A **alunita** – $Ka_13(SO_4)_2(OH)_{26}$ – foi registrado em apenas uma amostra (A2) da caverna S11C-0041, de crosta, representando 3% do total de amostras coletadas. O primeiro registro deste mineral no piso de um depósito de bauxita em uma caverna na Guiana Francesa. Já foi encontrado associado à aluminita no piso sedimentar de uma caverna na África do Sul. No Brasil, foi registrado em paredes de cavernas areníticas como uma crosta delgada (BOGGIANI; ATENCIO; KARMANN, 1986). Em Carajás, Maurity & Kotschoubey (1995) registraram a alunita em N1, interpretando que o potássio deste mineral teria como fonte o guano.

8 CONCLUSÕES

Não foi observada nenhuma interferência do tipo de rocha na elaboração das feições morfológicas ou na formação desses espeleotemas raros. As cavernas foram formadas na canga, na formação ferrífera ou na zona de contato entre as duas rochas.

A comparação dos mapas das cavernas constatou que seis, das sete cavernas estudadas, têm morfologia planimétrica tipo espongiforme. A única exceção é à caverna N4WS_0072 que tem planimetria mais retilínea, mas que também apresenta muitas irregularidades. A comparação das diversas feições analisadas demonstrou que as sete cavernas são bem semelhantes, o que as difere é o grau de intemperismo químico que cada uma sofreu.

Todas as cavernas são muito irregulares, com salões mais confinados e com temperaturas mais elevadas nos setores mais internos, o que pode ter sido um atrativo para a ocupação das colônias de morcegos. As seções longitudinais das cavernas mostram o piso concordante com a inclinação da vertente. Todas as cavernas apresentaram canais de drenagem de água pluvial infiltrada perenes ou temporários. Essas cavernas participam do escoamento subsuperficial das encostas. Essas drenagens podem ter trazido umidade para os morcegos, criando micro-ambientes quente, úmido e estável.

O gotejamento e o escoamento foram e continuam sendo os principais responsáveis pela geração de diversas feições nos pisos e nas paredes (buracos de dissolução, caneluras, canais de escoamento, pináculos de piso etc.). O guano existente nos pisos e paredes das cavernas pode ser o responsável pela expressiva acidez da água que circula nas cavernas. Atualmente todas as cavernas têm importantes depósitos de guano.

O guano também parece ser o principal responsável pelo aporte de fósforo dos espeleotemas das cavernas estudadas. Publicações anteriores já registraram os minerais fosfáticos nas cavernas de Carajás. A canga pode ter alguma participação porque contém algum fósforo, mas não é a principal.

O guano decomposto gera, ao que tudo indica, soluções aquosas extremamente ácidas formando feições morfológicas de corrosão como também libera fósforo e ferro para a formação dos espeleotemas raros. Em algumas cavernas os

depósitos de guano não são compatíveis com o tamanho atual das colônias de morcegos, o que pode significar sucessivos ciclos de ocupação da mesma caverna. Os processos que formam esses espeleotemas e essas feições raras são biogénicos. O guano também tem uma importância indireta na espeleogênese dessas cavernas ferruginosas, pois as soluções ácidas biogénicas dissolvem a rocha ferruginosa, ampliando pisos e paredes.

Os espeleotemas raros são formados quase que exclusivamente de fosfato. Os principais minerais fosfáticos foram: francoanellita, fosfosiderita, fosfato de cálcio, leucofosfita, newberyita, sfeniscidita, variscita e strengita. Predomina a combinação fosfato de ferro. Mesmo para as estalactites formadas no teto, a fonte de soluções contendo fósforo e ferro pode ter vindo de cima (salões oclusos) através da percolação dentro da rocha ou através de fraturas, como foi observado nas cavernas S11B_0094, N4WS_0067 e S11C_0041. Isso ainda precisa de mais pesquisas.

No grupo dos fosfatos ocorreram dois minerais raros, a Francoanellita e a Newberyita, ambos com pouca ocorrência no mundo e registrados pela primeira vez no Brasil. Na literatura consultada só há três registros do mineral francoanellita (Austrália, Korea e Itália); nas Américas é o primeiro. A Newberyita tem uma distribuição um pouco maior, já ocorreu na Ásia, América do Norte, Europa, entre outros. Na América do Sul é a segunda ocorrência em cavernas, a primeira foi registrada no Chile.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. R. L.; GONÇALVES, D. F.; SANTOS-JÚNIOR, A. E. A. **Petrografia e geoquímica de espeleotemas de cavidades subterrâneas, rochas ferríferas de serra norte, Carajás-pa.** 2015
- ALMEIDA, F. F. M. de. **Origem e Evolução da Plataforma Brasileira.** República Federativa do Brasil, Ministério de Minas e Energia, Depto. Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro. 1967.
- ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do programa Grande Carajás.** Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, 1991. 152 p.
- ATZINGEN, N. V.; CRESCÊNCIO, G. Estudos espeleológicos em Serra Pelada, Curionópolis – PA. **Boletim Informativo da Fundação Casa da Cultura de Marabá,** 1999. p. 63-72.
- ATZINGEN, N. V.; CRESCÊNCIO, G; CUNHA JR., W. R. Estudos espeleológicos na Serra dos Carajás, município de Parauapebas - PA. **Boletim Informativo da Fundação Casa da Cultura de Marabá,** p. 51-73. 2009.
- AULER, A. et al. **Estudos mineralógicos e químicos nos espeleotemas e litotipos das cavernas da região de Várzea do Lopes, MG.** GERDAU. Carste Consultores Associados, 2014. p. 26.
- AULER, A. et al. **Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes?** Karst Waters Institute. Special Publication, v. 18, p. 15-19, 2014.
- AULER, A. S. et. al., Espeleologia N4/N5/Pese/Pesl: **Diagnóstico Geoespeleológico, Biológico e Análise de Relevância.** Belo Horizonte, Carste Consultores Associados. Relatório inédito. 2011. p. 47-119
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30. Montes Claros. **Anais...:** [s.n.] 2009.
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. In: **Revista O Carste,** v. 17, n. 3, p. 70-72. 2005.
- BARTHEM, R.; GOULDING, M. **Os bagres balizadores: ecologia, migração e conservação de peixes amazônicos.** Tefé : Sociedade Civil Mamirauá, 1997. p. 140.
- BEISIEGEL, V. R. et al. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências,** v. 3, n.4, p. 215-242. 1973.

BIZZI, L. A. et al. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas na Escala 1:2.500.000. 4a Edição, 4 CD roms.** Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM. 2001.

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.

BOGGIANI, P. C., ATENCIO, D., KARMANN, I. **Carbonatos secundários da Gruta do Lago Azul (Bonito, MS): nesquehonita, hidromagnesita aragonita e calcita.** In Resumos e Breves Comunicacoes. Boletim 1. Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia. 1986.

CALUX, A. S. et al. **Serra Leste – Espeleologia. Diagnóstico Geoespeleológico, Diagnóstico Bioespeleológico, Análise de Relevância.** Carste Consultores Associados. Belo Horizonte, MG. 351 p. 2011.

CALUX, A. S.; **Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 220 p. 2013.

CAMPOS, J.; CASTILHO, A.F. Uma visão geográfica da Região de Carajás. In: MARTINS, F.D.; CASTILHO, A.F.; CAMPOS, J.; HATANO, F.M.; ROLIM, S.G. (orgs.). Fauna da Floresta de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres. São Paulo: Nitro Imagens. 2012.

CHABERT. C.; WATSON, R. A. Mapping and Measuring Caves: A conceptual Analysis. **NSS Bulletin**, v. 43, p. 3-11. 1981.

COELHO, A. H. F.; AULER, A. S.; PILÓ, L. B. PELLEGGATTI, F. Espeleologia EIA Global – Serra Norte (N4/N5). Belo Horizonte, MG. Relatório inédito. 300 p. 2013.

COUTO, M., L. F. et al. Formas de Ocorrência de Alumínio e Fósforo em Minérios de Ferro. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 6, n. 4, p. 206-209, abr.-jun. 2010.

DALL'AGNOL R. et al. Petrology of anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian Craton: **implications for the genesis of Proterozoic A-type granites.** Lithos, v. 46, p. 431-462. 1999.

DE CHÉLETAT, E. Le modele latéritique de l'ouest de la Guinée française. **Revue Geographie Physique et Geologie Dynamique**, v. 11, n. 5, p. 120. 1938.

DIXEY, F. Laterization in Sierra Leone. **Geological Magazine**, v. 57, n. 211. 1920.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, **Anais...**Belém: DOCEGEO. p. 11-54.1988.

DUTRA, G. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32., Barreiras. **Anais...**Barreiras: [s.n.], 2013.

FIGUEIREDO-SILVA, Rosaline Cristina. **Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos da Serra Norte, Província Mineral Carajás**. 2009. 236 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. Minas Gerais, 2009.

FRANCOANELLITA. Disponível em: <<http://www.mindat.org/min-2887.html>>. Acesso em: 23 jun. 2015 às 15h:05min.

GALARZA, M.A., and MACAMBIRA, M.J.B. **Petrologia e geocronologia das rochas encaixantes do depósito de Cu-Au Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Pará, Brasil**. in Klein, E.L., Vasquez, M.L., Rosa- Costa, L.T. (Eds.), Contribuições à Geologia da Amazônia 3, Belém, SBG, p. 153-168. 2002.

GAUTIER, E. F. **Madagascar-Essai de Geographie Physique**. Paris, Colin. 1902.

GOULDING, M, BARTHEM, R.; FERREIRA, E. **The Smithsonian atlas of the Amazon**. Washington: Smithsonian Books, 2003.

GUILD, P. W. **Geology and Mineral Resources of the Congonhas District**. United States Geological Survey Professional Paper, v. 290, n. 90 p. 1957.

HENWOOD, W. J. On the gold mines of Minas Geraes. – in: Observations on metalliferous deposits, and on subterranean temperature...**TRANSACTIONS of the Royal Geological Society of Cornwall**, v. 8, p. 168-370. 1871.

HERNÁNDEZ, J. M. **Manual de Espeleología**. Federação Espanhola de Espeleologia. Madri. 1997. 175 p.

HILL, C. A., FORTI, P. **Cave Minerals of the World**, first edition: Huntsville, Ala., National Speleological Society, 1986. 238 p.

HILL, C.A; FORTI, P. Cave Minerals of the World. **National Speleological Society - NSS**, 1997. 463 p.

JUTSON, J. T. An outline of the physiographic geology (physiography) of Western Australia. **Geological Survey of Western Australia Bulletin**, v. 61. 1914.

LINDENMAYER Z.G., RONCHI L.H., LAUX J.H. Geologia e geoquímica de mineralização de Cu-Au primária da mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 257-268. 1998.

LOBATO, L. M. et al. A Mineralização hidrotermal de ferro da Provincial Mineral de Carajás – controle estrutural e context na evolução metalogenética da provincial. *In*: MARINI et al. (Ed.). **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. Brasília: DNPM – CT/MINERAL – ADIMB, 2005. 782 p.

MACAMBIRA, J. B.; SCHRANK, A. Químico-estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 567-578. 2002.

MACHADO, N. et al. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329-354, 1991.

MARTINI, J.E. A concise review of the cave mineralogy of South Africa. *Anais Congresso Internacional de Espeleologia*, 11, Beijing China, p. 95 - 101. 1993.

MARTINS, Frederico D. et al. **Fauna da Floresta Nacional de Carajás**: estudos sobre vertebrados terrestres. São Paulo: Nitro Imagens, 2012.

MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, 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, v. 7, p. 331-362. 1995.

MAURITY, C.; KOTSCHOUBEY, B. Caracterização e Gênese dos Minerais de Espeleotemas das Cavernas do Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA**, 4., 1994, Belém. **Anais...Belém**: SBG, 1994.

MEIRELLES M. R.; DARDENNE, M. A. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás – Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 1, p. 41-50. 1991.

MÉRONA, B.; JURAS, A. A.; SANTOS, G. M.; CINTRA, I. H. A. **Os peixes e a pesca no baixo rio tocantins: Vinte anos depois da uhe Tucuruí**. Relatório Inédito – Eletrobras. 208p. il. 2010.

MLAY, P. M., F. Sagamiko: **The use of bat guano in the improvement of the nutritive value of poor quality roughage fed to ruminants in Tanzania**. *Vet. arhiv.*, v. 78, p. 417-427, 2008.

MOORE, G. W. Speleothem-a new cave term. *Nat. Espleol.Soc News*.10(6): 1-2. 1952.

NEWBERYITA. Disponível em:

www.darwincienciasnaturales.es/mineralogia/newberyita. Acesso em: 23 jun. 2016 às 14h:45min.

ONAC, B. P.; FORTI. Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview. **International Journal of Speleology**. v. 40, n. 2, p. 79-98. 2011.

PALACHE, C.; BERMAN, H.; FRONDEL, C. **O sistema de Mineralogia de James Dwight Dana e Edward Salisbury Dana, Yale University**. 1837-1892, v. 2, p. 699-710. 1951.

PALMER, A. N. Cave Geology. Dayton, Ohio: Cave Books. 454p. 1991.

PALMER, A. N. Speleogenesis in carbonate rocks. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, **Virtual Journal**. v. 1, p. 1-11, 2003.

PALMER, A.N. - **Origin and morphology of limestone caves**. Geological Society of America Bulletin, v. 103, n. 1, p. 1-21. 2010.

PARKER, C. W. et al. **Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás Formation, Brazil**. ICS. Proceedings. p. 442–446. 2013.

PIDGEON, R.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Th-U-Pb isotopic system and internal structures from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of enderbite. **Chemical Geology**, v. 166, p. 159-171, 2000.

PILÓ, L. B. et al. **Diagnóstico e Análise de Relevância das cavernas da Serra da Bocaina**. Belo Horizonte, MG. Carste Consultores Associados. Relatório inédito. 179 p. 2014.

PILÓ, L. B. et al. **Espeleologia do Projeto S11D – Serra Sul, Região de Carajás, PA**. Belo Horizonte, MG. Carste Consultores Associados. Relatório inédito, 231 p. 2010.

PILÓ, L. B. et al. **Estratégia de conservação da savana metalófila da Floresta Nacional de Carajás**. Espeleologia. ICMBio. 66 p. 2016.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Mineralogia de Espeleotemas em rochas ferríferas da Região de Carajás, Pará. **Instituto do Carste**. Belo Horizonte. 60 p. (Inédito). 2011.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S.; MARTINS, F. Carajás National Forest: iron ore plateaus and caves in Southeastern Amazon. In: Vieira, B.C.; Salgado, A.A.; Santos, L. J.C. (Editors). **Landforms and landscapes of Brazil**. New York, Springer, p. 273-283. 2015.

PILÓ, L. B.; CASSIMIRO R.; COELHO, A. H. F. **Diagnóstico Geoespeleológico de S11C – Serra Sul, Região de Carajás, PA.** Belo Horizonte, MG. Bioespeleo Consultoria. Relatório inédito. 2015. 114 p.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. **Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA.** In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 30, Montes Claros. Anais... Montes Claros: SBE, 2009. p. 181-186.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. **Mineralogia dos espeleotemas das cavernas ferríferas da região de Carajás, PA.** In: Seminário Vale de Geologia do Minério de Ferro e I Seminário de Espeleologia. Anais... Belo Horizonte. 2011. p. 80-81.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S.; COELHO, A.; SCHERER, R. **Indícios de bioerosão (paleotocas) em cavernas ferríferas da região de Carajás, Pará.** In: Simpósio Mineiro do Carste – carste e cavernas: minas de informações, 2. Resumos e pôsteres... CNKC/IGC-UFMG, Belo Horizonte, Brasil. 2013. p.39-40.

PILÓ, L.B.; COELHO, A. H. F.; REINO J. C.R.; **GEOESPELEOLOGIA EM ROCHAS FERRÍFERAS: CENÁRIO ATUAL E CONSERVAÇÃO.** 2015

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. **Mineralogia de espeleotemas das grutas de minério de ferro de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** II Encontro Brasileiro de Estudos do Carste. 26 a 28 de julho de 2007 – Instituto de Geociências, IG - USP. Caderno de Resumos; pág. 32. 2007.

PINHEIRO, R. V. L. et al. **Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA).** Grupo Espeleológico Paraense. Relatório inédito, 38 p. 1985.

PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C. W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. In: CONGRESSO DE ESPELEOLOGIA DA AMÉRICA LATINA E DO CARIBE, 1., 1988, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: [s.n.], p. 179-186. 1988.

PISSIS, N. A. Mémoire sur la position géologique des terrains de la partie australe du Brésil et sur les soulèvements qui, à diverses époques, ont changé le relief de cette contrée. **Memoire de L’Institute de France**, v. 10, p. 353-413, 1842.

ROSIÈRE, C. A. et al. Structure and iron mineralization in the Carajás Province. In: **Proceedings Iron Ore 2005**, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series, n. 8, p. 143-150. 2005.

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

RUCHKYS, U. A. et al. **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: Proposta para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero**. 1ª edição. Campinas-SP: Sociedade Brasileira de Espeleologia. 2015.

SANTOS, J. O. S. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: BIZZI, L. A. et al. (Ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, p. 169-226. il. 2003.

SILVA, I. C. R.; SANTOS-JÚNIOR, A. E. A. **Gênese e evolução de espeleotemas em formações ferríferas bandadas, cavidade N4E-029, serra Norte de Carajás-pa**. 2015

SIMMONS, G. C. Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **The National Speleological Society Bulletin**, v. 25, p. 66-72. 1963.

SIMMONS, G. C. Leucophosphite, a new occurrence in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **The American Mineralogist**, v. 49, p. 377-386. 1964.

SOUZA-FILHO, P. W. M. et al. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **ELSEVIER Journal of Environmental Management**. v. 167, p. 175-184. 2016.

SUGUIO, K. Recent Progress in Quaternary Geology of Brazil. **Episodes**. Ottawa, v.22, n.3, p. 217-220, 1999.

TALLARICO, F.H.B., FIGUEIREDO, B.R., GROVES, D.I., KOSITCIN, N., MCNAUGHTON, N.J., FLETCHER, I.R., AND REGO, J.L. **Geology and SHRIMP U-Pb Geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization: Economic Geology**, v. 100, p. 7-28. 2005.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. **A evolução do Craton Amazônico**. In: MANTESSO-NETO, V. et al. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 471-485. 2004.

TAYLOR, D. et al. Genesis of High-Grade Hematite Orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. **Economic Geology**, v. 96, p. 837–873, 2001.

TOLBERT, G. E. et al. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, p. 985-994. 1971.

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, 328 p. 2008.

WEBB, J. A.; JOYCE, E. B.; STEVENS, N. C. **Cavernas de lava da Austrália**. Em Anais do Simpósio Internacional Terceira em Vulcanospeleology. Fundação Espeleológica International, Seattle. p. 74-85. 1982.

WHITE, W. B. **Cave Minerals and espeleothems**. In: FORD T. D. & CULLINFOR, C.H.D. The Science of speleology. London, Acadamec Press, cap. 8. P 267-328. 1976.

WIEGAND, J; FEY, M; HAUS, N; KARMANN, I. **Geochimische und hydrochimische untersuchungen zur genese von sandstein-und quarzitkarst in der Chapada Diamantina und im eisernen viereck (Brasilien)**. Z. dt. Geol. Ges. 155: 61-90. 2004.