UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE SIMÃO PONTES

PATRIMÔNIO GEOLÓGICO CÁRSTICO EM ROCHAS ARENÍTICAS E POLÍTICAS PÚBLICAS DE GEOCONSERVAÇÃO, COM BASE EM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA (PR)

CURITIBA

2019

HENRIQUE SIMÃO PONTES

PATRIMÔNIO GEOLÓGICO CÁRSTICO EM ROCHAS ARENÍTICAS E POLÍTICAS PÚBLICAS DE GEOCONSERVAÇÃO, COM BASE EM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA (PR)

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito para obtenção do Doutorado em Geologia Ambiental, linha de pesquisa Geoconservação e patrimônio geológico.

Orientador: Dr. Luiz Alberto Fernandes
Coorientadores: Dr. Gilson Burigo Guimarães e Dr. Mário Sérgio de Melo

CURITIBA

2019

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P814p Pontes, Henrique Simão
Patrimônio geológico cárstico em e políticas públicas de geoconservação, com base em estudo de caso do município de Ponta Grossa (PR) [recurso eletrônico] / Henrique Simão Pontes. – Curitiba, 2019.

Tese – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós – Graduação em Geologia, 2019.

Orientador: Luiz Alberto Fernandes. Coorientadores: Gilson Burigo Guimarães e Mário Sérgio de Melo.

1. Geodiversidade. 2. Licenças ambientais. 3. Rochas. 4. Relevo (Geografia). I. Universidade Federal do Paraná. II. Fernandes, Luiz Alberto. III. Guimarães, Gilson Burigo. IV. Melo, Mário Sérgio. V. Título.

CDD: 551

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIENCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA - 40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **HENRIQUE SIMÃO PONTES** intitulada: **PATRIMÔNIO GEOLÓGICO CÁRSTICO EM ROCHAS ARENÍTICAS E POLÍTICAS PÚBLICAS DE GEOCONSERVAÇÃO, COM BASE EM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA (PR)**, sob orientação do Prof. Dr. LUIZ ALBERTO FERNANDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Outubro de 2019.

LUIZ ALBERTO FERNANDES
Presidente da Banca Examinadora

AUGUSTO SARREIRO AULER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS)

RODOLFO JOSÉ ANGULO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

JOEL GEORGES MARIE ANDRE RODET
Avaliador Externo (UNIVERSITÉ DE ROUEN NORMANDIE)

Pesquisar cavernas ao lado da pesquisadora que é o amor de minha vida
é minha maior satisfação. Dedico este trabalho a minha esposa,
Laís Luana Massuqueto, amor de minha vida,
minha inspiração vem de você.

AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradecimentos são direcionados aos meus pais, Laércio Simão Pontes e Lorena dos Santos Simão Pontes, por todo o suporte que me deram durante toda minha vida, pelo apoio incondicional aos estudos, por segurar a barra nos momentos de dificuldades e nunca deixar faltar nada em minha vida. Ter pais como vocês facilitou, alegrou e animou muito minha vida.

Ao meu irmão, Felipe Simão Pontes, meu grande parceiro de vida, professor, pesquisador, extremamente inteligente, paciente, conselheiro, meu grande amigo de sangue. Sempre falo que tenho orgulho de ter você como meu irmão.

À minha esposa, Laís Luana Massuqueto, minha melhor amiga, meu alicerce, amor de minha vida a quem dedico esta tese. Sempre ao meu lado, nas dificuldades, nos momentos de alegria, nas conquistas, sem você não teria chego aonde cheguei. Suas observações, revisões, parcerias em trabalho de campo e, sobretudo, sua paciência, foram contribuições de importância imensurável para o meu doutoramento. Ter você sempre comigo é algo que renova minha alma, me inspira, me impulsiona. Você é tudo para mim e quero você sempre comigo, te amo meu amor.

Aos familiares e aqueles e aquelas também considerados como família, não citados anteriormente, mas que de uma forma ou de outra fazem parte de minha vida e contribuem para meu crescimento social e formação profissional. Minha madrinha, Erlete dos Santos Serzouski, minha cunhada (esposa de meu irmão) Ana Maria Bourguignon de Lima, minhas afilhadas Clarice Lima Pontes e Cecília Lima Pontes, meus sogros (meus segundos pais) Selso Lemos Massuqueto e Nerli Aparecida Massuqueto e suas filhas, as cunhadas Lilian Patrícia Massuqueto e Marieli Aparecida Massuqueto. Um agradecimento especial ao Fábio Barros, o Binho, companheiro que me apresentou pela primeira vez uma caverna, toda esta minha paixão por cavernas começou lá na Caverna da Chaminé, há 13 anos.

Aos compadres e amigos, Heder Leandro Rocha e Daniela Franzóia Moss (agora com a pequena e linda filha deles, a Aurora), que estão distante (Argentina), mas sempre presentes em minha vida. Um especial agradecimento pelas conversas e divagações sobre a vida, pesquisa e futuro. Pelos bons momentos que passamos juntos, em especial a nossa tão desejada viagem no final do ano de 2018, quando pudemos espairecer a mente, nos divertir, conhecer nossa afilhada Aurora, falar

sobre os problemas políticos do nosso Brasil, discutir sobre o amanhã e nos apoiar neste estranho momento que vivemos.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Luiz Alberto Fernandes, conhecido como Lurdinha por todos, pela paciência, dedicação, parceria e, além de professor e orientador de pesquisas, um ombro amigo que me apoiou, escutou e consolou em momentos difíceis durante esta trajetória.

Ao sempre parceiro, em diversos momentos, desde orientador, colega de profissão, companheiro de cavernadas, pedaladas, cinema, eventos, e de tantas outras atividades, um muito obrigado ao meu co-orientador, Professor Gilson Burigo Guimarães, pela atenção sempre dispensada de maneira imediata.

Destaco uma observação no agradecimento ao meu segundo co-orientador, Professor Mário Sérgio de Melo. Não é exagero dizer que seu trabalho me inspirou desde o primeiro ano do curso de graduação em Geografia. Um dos momentos mais marcantes de minha vida profissional e acadêmica, de grande aprendizado, foi quando realizei trabalhos de campo com o Professor Mário, elaborando seções geológicas em cortes de rodovias e paredões rochosos da Formação Furnas. Em várias ocasiões estivemos apenas nos dois em campo, para mim, eram aulas particulares, uma experiência e oportunidade que poucos tiveram.

Agradeço aos colegas de doutorado e do Grupo de Pesquisa CNPq/UFPR Geoconservação e patrimônio geológico, pelas conversas, debates, fofocas, festas e momentos de alegrias e anseios.

Aos colegas do Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE) por todas as parcerias em muitos dos levantamentos de campo que geraram dados para esta tese.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado (Processo de número 1554618). Foi quatro anos de auxílio, um benefício de extrema importância, pois sem ele não teria conseguido realizar meu doutorado. Em destaque, lembro que esta instituição está passando por cortes e bloqueios de verbas de maneira totalmente drástica nos últimos tempos, acabando com milhares de bolsas e afetando vários pesquisadores em todo o país.

À Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa A0016_2015 – Valores da geodiversidade de cavidades subterrâneas no contexto da prestação de serviços ecossistêmicos: subsídios para a

elaboração do plano de manejo do Parque Nacional dos Campos Gerais (Paraná) e propostas para ampliação da unidade de conservação.

Aos laboratórios de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar (LabESed) e de Análise de Minerais e Rochas (Lamir) e o Centro de Microscopia Eletrônica (CME), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Laboratório de Geologia Pesquisa e ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-labmu), da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e ao Professor Dr. Daniel Atencio, do Laboratório de Difratometria de Raios X, da Universidade de Paulo (USP), por todo o apoio nas análises e procedimentos laboratoriais utilizados nesta tese de doutorado.

A todas, todos e *todes* que defendem e lutam para que sempre tenhamos ensino superior público, gratuito, de qualidade e acessível de forma universal neste país.

"A felicidade só é verdadeira quando compartilhada."

Christopher McCandless (Alexander Supertramp)

RESUMO

As rochas da Formação Furnas (Siluriano/Devoniano) e Arenito Vila Velha (Carbonífero Superior), da Bacia do Paraná, são compostas predominantemente por quartzoarenitos e formam típico relevo cárstico não carbonático. Contudo, a falta de compreensão e conhecimento sobre o conceito de carste não carbonático propicia ações equivocadas de órgãos públicos ambientais, sobretudo em relação aos processos de licenciamento ambiental. Neste panorama, os objetivos foram caracterizar as feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas nestas rochas, em exposição no município de Ponta Grossa (PR), incluindo processos e gênese da carstificação nestes arenitos, definir uma nova região cárstica considerando os novos conceitos e os riscos à conservação do patrimônio geológico cárstico e propor ações como medidas de geoconservação alinhadas com as políticas públicas. Levantamentos de campo, caracterização de litotipos, elaboração de seções geológicas e identificação das feições cársticas integraram a primeira etapa da pesquisa. Análises estratigráficas, petrográficas, de caracterização faciológica e químicas foram realizadas em fase posterior, de escritório e laboratórios. A legislação, com foco no controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico de Ponta Grossa e região, foi avaliada com base na legislação federal, estadual e municipal. As buscas por levantamentos cársticos/espeleológicos em estudos de impactos ambientais foram realizadas em processos de licenciamento ambiental disponíveis pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) de Ponta Grossa. O inventário e quantificação da geodiversidade subterrânea permitiu estabelecer um parâmetro matemático para a avaliação das cavernas. Este método é proposto como um instrumento de gestão, pois indica os ambientes mais expressivos cientificamente e os mais ameaçados, que exigem ações urgentes de manejo. A gênese do carste da área é interpretada a partir do modelo de primocarste, com carstificação por arenização e fantomização. As feições geológicas de origem cárstica são cavernas, depressões no terreno, canais de parede e teto, dutos de dissolução, cúpulas, alvéolos, rochas arenizadas e/ou fantomizadas e espeleotemas. Associam-se principalmente a arenitos com granulação média. Estruturas sedimentares e tectônicas têm controle primordial no desenvolvimento destas. As características litofaciológicas também contribuem para a geração das feições, mas não são fatores determinantes. As descontinuidades físicas das rochas são importantes, pois facilitam a circulação de fluidos em zonas profundas, possibilitando o intemperismo químico e a abertura de vazios, dutos, galerias e cavernas. A criação de dutos e núcleos de dissolução em contexto freático e evolução destes na zona aerada teve como consequência a formação de depressões no terreno (dolinas) e cavernas. Os espeleotemas são compostos principalmente por sílica (opala-A e sílica criptocristalina) e caulinita, com menor ocorrência de gipsita e óxido de ferro amorfo associado à goethita e hematita. A pesquisa identificou seis tipos de espeleotemas: arborescentes, cogumelos, estalactíticos, estalagmíticos, colunares com crescimento horizontal/ascendente e fibrosos. A gênese destas feições foi associada a processos químicos inorgânicos, assim como à organomineralização. Com o intuito de contribuir com a gestão do território, melhorias na legislação e a geoconservação, são apresentadas a região cárstica dos Campos Gerais (RCCG), uma revisão dos conceitos de região cárstica e província espeleológica e o cálculo do potencial espeleológico estimado (PEE). Lacunas nas políticas públicas e inúmeros problemas legais em procedimentos

administrativos foram detectados, mostrando os riscos para a proteção do patrimônio geológico da área analisada frente às várias atividades e empreendimentos de significativo potencial degradador. A gestão do território na região cárstica dos Campos Gerais e em outras áreas cársticas deve ser orientada em instrumentos de controle do uso e ocupação do solo, claros e concisos. O princípio da precaução deve nortear as medidas de geoconservação em áreas de relevo cárstico.

Palavras-chave: Relevo cárstico. Rochas não carbonáticas. Primocarste. Gestão do território. Formação Furnas. Arenito Vila Velha.

ABSTRACT

The Furnas Formation (Silurian/Devonian) and Vila Velha Sandstone (Upper Carboniferous), Paraná Basin, are predominantly composed by quartz sandstones and form typical non-carbonate karst. However, the lack of understanding and knowledge about the non-carbonate karst concept results in wrong actions by the environmental public agencies, especially in relation to environmental licensing processes. In this scenario, the aims were to characterize the karst geological features developed in these rocks, exposed in Ponta Grossa (Paraná State), including identification of karstification processes and genesis, definition of a new karst region considering the new concepts and the risks to conservation of karstic geological heritage and proposal of actions as geoconservation measures in accordance to legislation. Field surveys, lithotype characterization, elaboration of geological sections and identification of karst features integrated the first stage of the research. Stratigraphic, petrographic and chemical analyzes and faciological characterization were performed at a later stage, in the office and laboratories. The legislation, aiming at the use control and protection of the karst geological heritage of Ponta Grossa municipality and Campos Gerais region, was analyzed based on federal, state and municipal laws. To identify karst and speleological surveys in environmental impact studies searches were performed in environmental licensing processes available from the Paraná Environmental Institute and Ponta Grossa Municipal Environmental Secretariat. The inventory and quantification of underground geodiversity allowed establishing a mathematical parameter for the caves evaluation. This method is proposed as a territory management tool because it indicates the most scientifically expressive and threatened environments that require urgent management actions. The karstogenesis of the study area was interpreted from the primokarst model, with karstification by arenization and fantomization. The geological features of karst origin are caves, ground depressions, wall and ceiling half-tubes, dissolution ducts, cupolas, alveolus, arenized and/or fantomized rocks and speleothems. They are mainly associated with medium granulation sandstones and sedimentary and tectonic structures have an important control in their development. The lithofaciological characteristics also contribute to the occurrence, but are not determining factors. Rocks physical discontinuities are important because they facilitate the circulation of fluids in deep areas, allowing chemical weathering and the opening of voids, ducts, galleries and caves. The creation of dissolution ducts and cores in the phreatic zones and their evolution in the aerated zone resulted in the formation of depressions in the ground (dolines) and caves. Speleothems are mainly composed of silica (opal-A and cryptocrystalline silica) and kaolinite, with lower occurrence of gypsum and amorphous iron oxide associated with goethite and hematite. They occur in six types (arborescent, mushroom, stalactitic, stalagmitic, columnar with horizontal/ascending growth and fibrous) and the genesis of these materials is associated with inorganic chemical processes as well as organomineralization. In order to contribute to territory management, legislation improvements and geoconservation, the Campos Gerais karst region, a review of the concepts of karst region and speleological province and the calculation of estimated speleological potential are presented. Loopholes in legislation and numerous legal problems in administrative procedures were detected, showing the risks to the protection of the geological heritage in the analyzed area against the various activities and undertakings of significant degrading potential. The territory

management in the Campos Gerais karst region and in other karst areas should be guided by clear and concise land use and occupation control instruments. The precautionary principle should guide the geoconservation actions in this karst area.

Key words: Karst landscape. Non-carbonate rocks. Primokarst. Territory management. Furnas Formation. Vila Velha Sandstone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da área de estudos 18

Figura 1.2 - Feições cársticas desenvolvidas nas rochas da Formação Furnas 19

Figura 1.3 - Feições cársticas desenvolvidas no Arenito Vila Velha 20

Figura 1.4 - Carta estratigráfica das sequências siluro-devoniana e permocarbonífera da Bacia do Paraná 27

Figura 1.5 - Paredões rochosos da Formação Furnas na área de estudo, local denominado de Setor Macarrão 28

Figura 1.6 - Famosas formas ruiniformes do Arenito Vila Velha, no Parque Estadual de Vila Velha 26

Figura 1.7 - Diferentes tipos de ocorrência de rocha arenizada e/ou fantomizada na área de estudo 37

Figura 1.8 - Esquema explicativo das etapas do primocarste (arenização e fantomização) 39

Figura 1.9 - Taxas de dissolução do quartzo expressas em função do pH e do consumo de CO_2 associado à atividade fotossintética 42

Figura 2.1 - Location of the Campos Gerais National Park and distribution of the caves 76

Figura 2.2 - Campos Gerais National Park caves 77

Figura 2.3 - Geodiversity features in the Campos Gerais National Park caves 80

Figura 2.4 - Geodiversity features in the Campos Gerais National Park caves 81

Figura 3.1 - Localização da área de estudo 97

Figura 3.2 - Tipos de espeleotemas da área de estudo 103

Figura 3.3 - Análise de EED de espeleotema da Grutas da Inspirada, na Formação Furnas, e Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa, Arenito Vila Velha 107

Figura 3.4 - Imagens secundárias de elétrons geradas por MEV mostrando elementos biológicos em espeleotemas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha 108

Figura 3.5 - Espeleotemas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha mostrando materiais biológicos totalmente silicificados 109

Figura 3.6 - Formação de espeleotemas com a mediação de biofilmes (EPS) 110

Figura 3.7 - Imagem eletrônica secundária mostrando precipitação de sílica no entorno de uma teia de aranha 112

Figura 3.8 - Fotomicrografias de seção petrográfica mostrando alta porosidade em porção externa (microfácies superior) de um espeleotema 116

Figura 3.9 - Espeleotema típico e fotomicrografia de seções finas (todas com polarizadores paralelos) mostrando as subdivisões do espeleotema 117

Figura 3.10 - Duas microfácies identificadas nos espeleotemas do tipo estalagmítico 118

Figura 4.1 - Mapa de localização da área de estudo 135

Figura 4.2 - Feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas nos quartzoarenitos da Formação Furnas (a, c, d, e, g, h) e subunidade Vila Velha 139

Figura 4.3 - Exemplos de alteração *in situ* na Formação Furnas e Arenito Vila Velha 147

Figura 4.4 - Galeria em cavidade subterrânea da Formação Furnas exibindo passagem fantomizada 159

Figura 5.1 - Proposta de procedimentos operacionais para o reconhecimento e classificação de região cárstica e província espeleológica para o Brasil 178

Figura 5.2 - Proposta de classificação de região cárstica e província espeleológica, com base na existência de relevo cárstico (carbonático ou não) 180

Figura 5.3 - Região cárstica dos Campos Gerais e suas cavidades subterrâneas areníticas 182

Figura 5.4 - Distribuição das cavidades subterrâneas areníticas do distrito cárstico de Ponta Grossa 186

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1.1 - Modelo carstogenético de primocarste e situações para o seu desenvolvimento 36

Quadro 4.1 - Características do padrão de ocorrência das feições cársticas da área de estudo 155

Quadro 5.1 - Cavidades subterrâneas de Ponta Grossa, por unidade geológica 184

Quadro 5.2 - Análise da ausência de levantamentos cárstico/espeleológicos em estudos ambientais para licenciamento de empreendimentos com alto potencial degradador na região cárstica dos Campos Gerais 191

Quadro 5.3 - Legislação de Ponta Grossa que trata, de maneira direta ou indireta, do controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico municipal 193

Tabela 2.1 - The quantitative method used to evaluate the cave geodiversity 79

Tabela 2.2 - Quantification of underground geodiversity features and vulnerability of PNCG caves 81

Tabela 2.3 - Quantification of expropriation priority, sensibility and potential of scientific use of PNCG caves 84

Tabela 2.4 - PNCG Caves classification (ranking) considering the underground geodiversity features 86

Tabela 3.1 - Detalhamento das amostras e análises realizadas 101

Tabela 5.1 - Área do distrito cárstico de Ponta Grossa e relação com as porções exploradas, valores por unidade geológica e total 185

Tabela 5.2 - Potencial espeleológico estimado do distrito cárstico de Ponta Grossa, por unidade geológica 187

Tabela 5.3 - Potencial espeleológico estimado da região cárstica dos Campos Gerais. 188

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA 17

1.2 JUSTIFICATIVA 23

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO 26

1.4 CARSTE EM ARENITOS NÃO CARBONÁTICOS: CARSTIFICAÇÃO POR *FANTOMIZAÇÃO E ARENIZAÇÃO* 32

1.5 INTEMPERISMO QUÍMICO DO CIMENTO (CAULINITA E ÓXIDO DE FERRO) E DO ARCABOUÇO QUARTZOSO 40

1.6 GEODIVERSIDADE, PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO 44

1.7 MATERIAIS E MÉTODOS 48

1.8 FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES DA TESE 53

REFERÊNCIAS 55

2 RESULTADO E DISCUSSÕES 72

2.1 CAVES GEODIVESITY EVALUATION AS AN INSTRUMENT TO THE MANAGEMENT OF THE CAMPOS GERAIS NATIONAL PARK, SOUTHERN BRAZIL 72

2.2 ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS EM QUARTZOARENITOS, MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, SUL DO BRASIL 93

2.3 CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE FEIÇÕES CÁRSTICAS DA FORMAÇÃO FURNAS E ARENITO VILA VELHA NO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA (PARANÁ, BRASIL) 130

2.4 A REGIÃO CÁRSTICA DOS CAMPOS GERAIS, PARANÁ/SÃO PAULO (BRASIL): REVISÃO DE CONCEITOS, POTENCIAL ESPELEOLÓGICO E POLÍTICAS PÚBLICAS DE GEOCONSERVAÇÃO 174

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 207

REFERÊNCIAS 213

ANEXOS 246

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

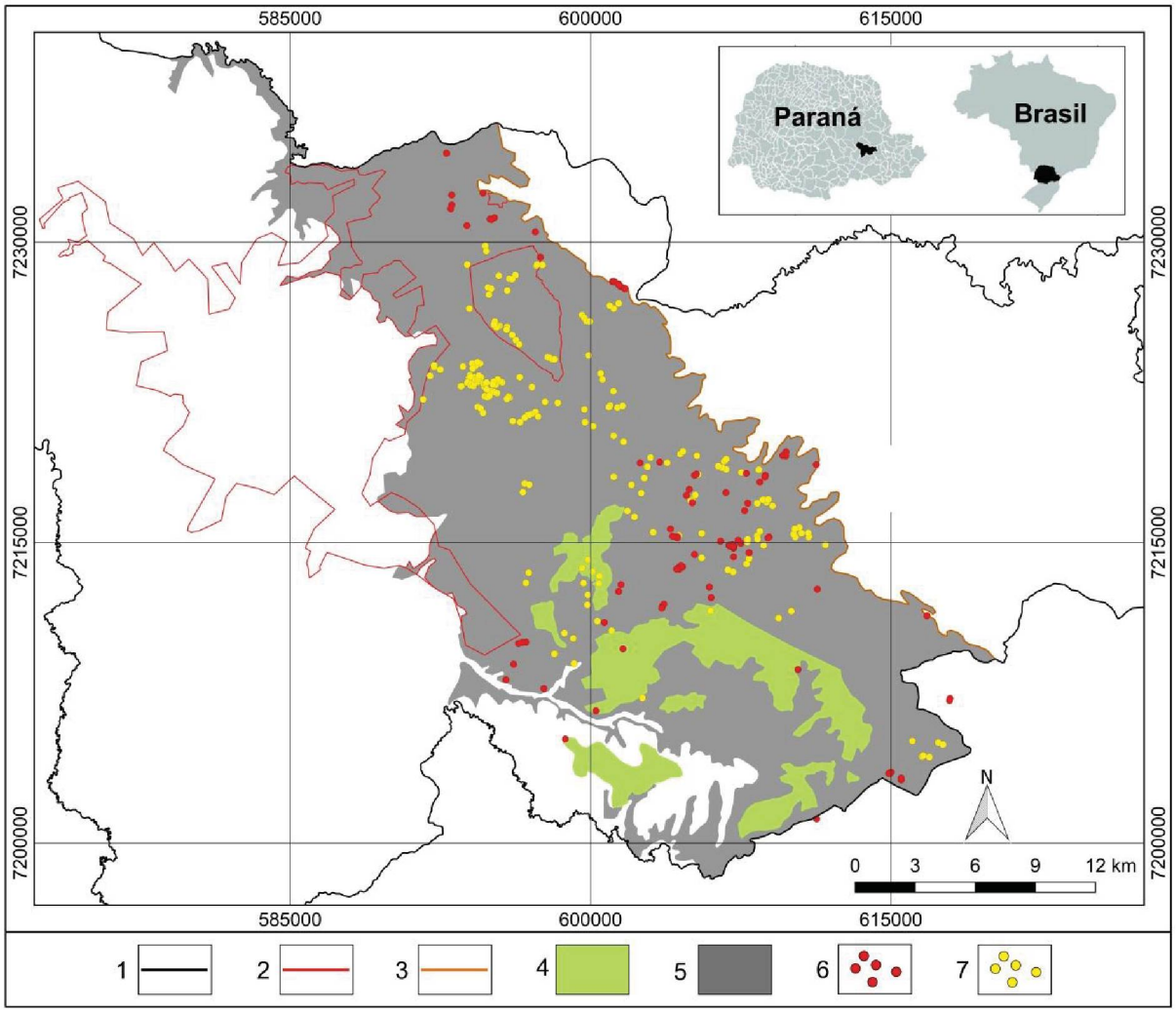
Para entender a evolução de um relevo cárstico é preciso identificar e estudar determinadas singularidades geológicas específicas que, geralmente em conjunto, são indícios importantes para a identificação do tipo de carstogênese e espeleogênese atuantes em determinado local. Os modelos carstogenéticos são propostos a partir da análise destas singularidades, que são feições geológicas identificadas principalmente em ambientes subterrâneos, como os *espeleogens*, feições desenvolvidas a partir de processos no qual o intemperismo químico atua significativamente sobre as rochas, sobretudo em ambiente freático.

Assim sendo, são as feições geológicas, presentes principalmente nas cavernas que permitem identificar os tipos de processos aos quais as rochas foram submetidas e investigar se houve a ação de águas superficiais ou subterrâneas, em ambiente freático ou vadoso.

Analisar o conjunto de feições geológicas de origem cárstica é o primeiro passo para a classificação de um relevo cárstico. No entanto, muitas vezes tais feições foram descaracterizadas devido aos processos evolutivos da caverna e do relevo em superfície, envolvendo o intemperismo, desabamento de blocos, revestimento por precipitação de minerais, entre outras variáveis que podem ocultar, descaracterizar ou destruir totalmente estes registros.

Nesta pesquisa busca-se identificar feições desta natureza e para isso se utiliza como conceito chave *carste não carbonático*. A área de estudos situa-se na borda leste da Bacia do Paraná, no município de Ponta Grossa, onde são expostas rochas da Formação Furnas (Siluriano-Devoniano) e da subunidade Vila Velha (Carbonífero-Permiano) pertencente à Formação Campo Mourão, unidades essencialmente compostas por quartzoarenitos (figura 1.1).

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS. CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS: 1) LIMITE MUNICIPAL DE PONTA GROSSA; 2) LIMITE URBANO; 3) ESCARPA DEVONIANA; 4) ÁREAS DE AFLORAMENTO DO GRUPO ITARARÉ QUE APRESENTA O ARENITO VILA VELHA; 5) ÁREA DE AFLORAMENTO DA FORMAÇÃO FURNAS; 6) CAVIDADES SUBTERRÂNEAS E; 7) DEPRESSÕES NO TERRENO.



Nestas rochas foram identificadas feições de origem cárstica que são consideradas chave para o enquadramento como relevo cárstico, incluindo cavernas, depressões no terreno, espeleotemas, dutos de dissolução, cúpulas, alvéolos (*tafoni*), canais de tetos e paredes (*half-tubes*) e rochas arenizadas e/ou fantomizadas (figuras 1.2 e 1.3). A presença destas feições geológicas permite considerar que nestes arenitos quartzosos de cimentação não carbonática ocorrem processos de carstificação, envolvendo a dissolução de seus minerais constituintes, incluindo os grãos de quartzo.

FIGURA 1.2 - FEIÇÕES CÁRSTICAS DESENVOLVIDAS NAS ROCHAS DA FORMAÇÃO FURNAS: CAVERNA DO ZÉ (A); DEPRESSÃO NO TERRENO (B); ROCHA ARENIZADA E/OU FANTOMIZADA (C); ESPELEOTEMAS (D); ALVÉOLOS (E); CÚPULAS (F); DUTO DE DISSOLUÇÃO (G) E; CANAL DE PAREDE (H).

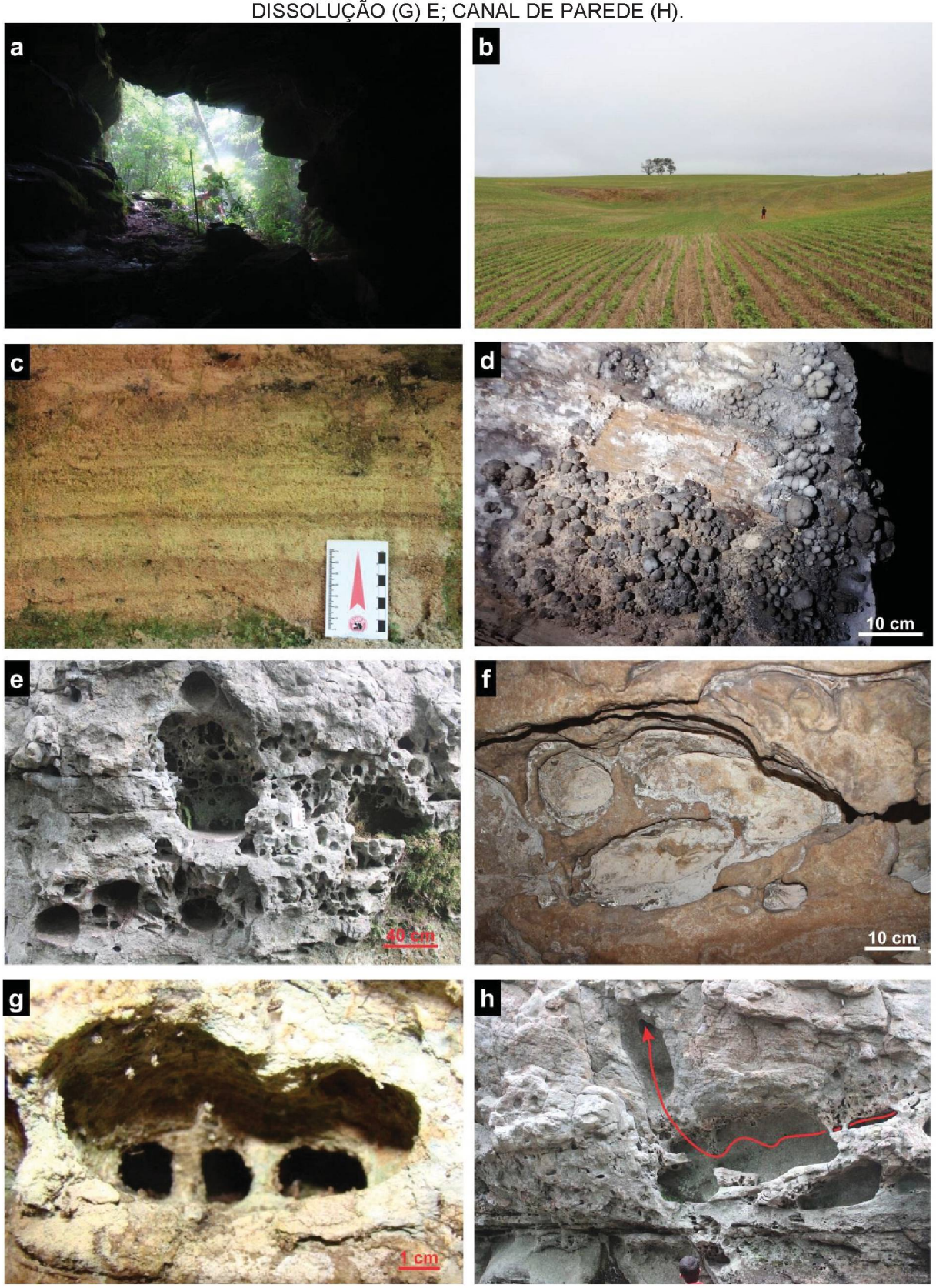
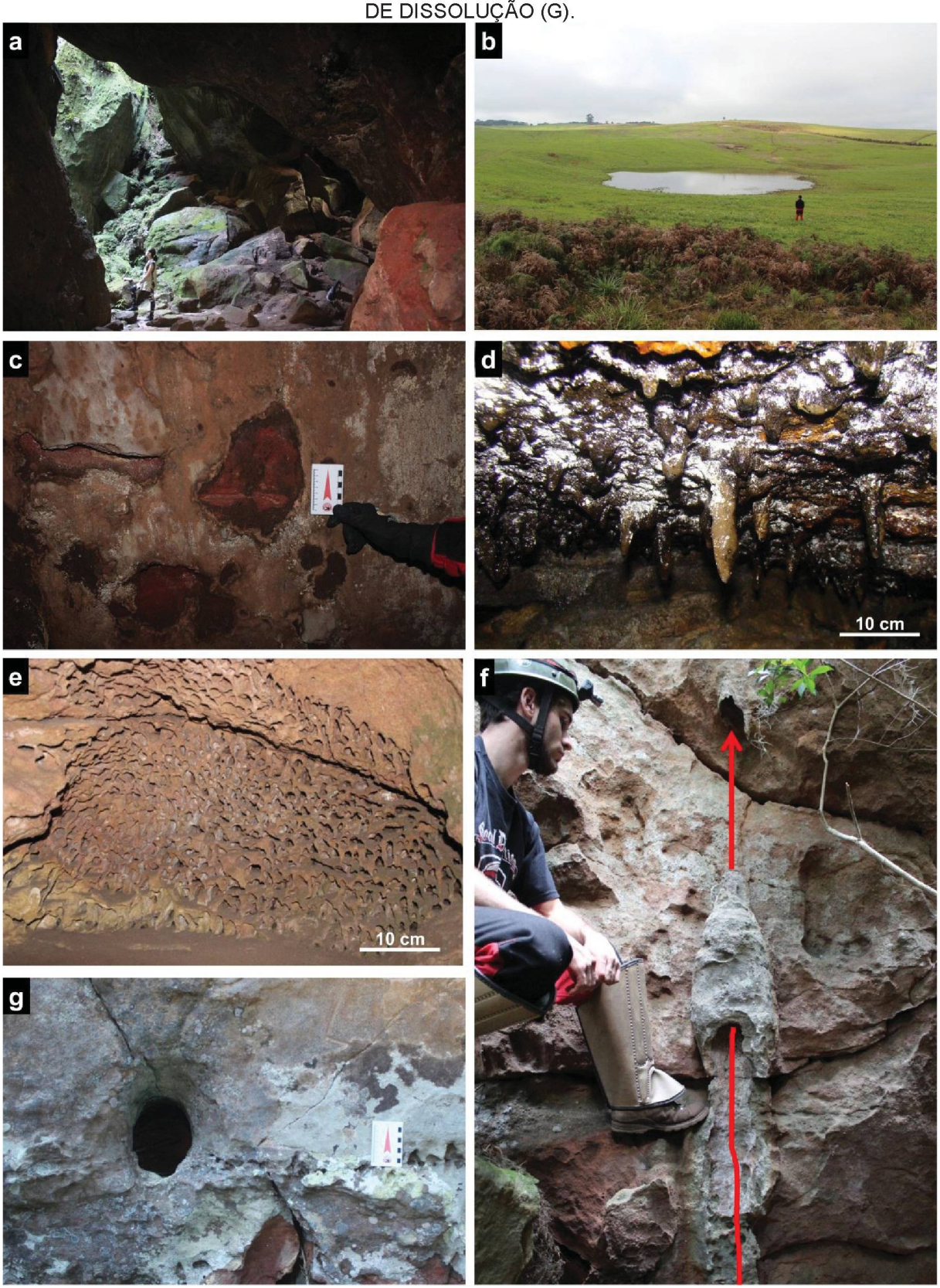


FIGURA 1.3 - FEIÇÕES CÁRSTICAS DESENVOLVIDAS NO ARENITO VILA VELHA: GRUTA ANDORINHAS DA PEDRA SUSPENSA (A); DEPRESSÃO NO TERRENO (B); ROCHA ARENIZADA E/OU FANTOMIZADA (C); ESPELEOTEMAS (D); ALVÉOLOS (E); CANAL DE PAREDE (F) E; DUTO DE DISSOLUÇÃO (G).



No entanto, a literatura geralmente relaciona relevo cárstico ou feições cársticas com um tipo litológico específico, principalmente composto por rochas carbonáticas, como os relevos desenvolvidos em calcários, metacalcários, metadolomitos e mármores (DERRUAU, 1966; BLOOM, 1970; CHRISTOFOLETTI, 1974; BIGARELLA, BECKER e SANTOS, 1994; KARMANN, 2000; GUERRA, 2003; SALLUN FILHO e KARMANN, 2007; BIGARELLA, BECKER e SANTOS, 2007).

Nos relevos desenvolvidos em rochas carbonáticas desenvolvem-se rios subterrâneos, dolinas e cavernas repletas de expressivos espeleotemas, com grandes dimensões volumétricas e de extensão. Como exemplo disso, no estado do Paraná, há diversas cavernas no vale do rio Ribeira, como as grutas do "Varzeão" e "Dá a Volta" no município de Doutor Ulysses, ambas com mais de dois mil metros de extensão, pertencentes à região cárstica do Grupo Açungui, conforme classificação de Oliveira-Galvão, Jansen e Lima (2009).

Os autores mencionados anteriormente indicam também outras regiões cársticas do Brasil, incluindo na lista o carste carbonático dos grupos Bambuí, Una, Corumbá, Apodi e Brusque, a Formação Vazante, entre outras unidades com alta concentração de cavernas. Porém, a ocorrência de diversas feições cársticas no relevo desenvolvido nas rochas da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha, apresentando processos genéticos semelhantes aos que condicionam a existência de feições cársticas em áreas carbonáticas, sustenta a proposta de classificar a área de afloramento destas unidades geológicas como uma das regiões cársticas brasileiras. Entretanto, o Arenito Vila Velha, por se tratar de uma unidade de pouca espessura (de algumas dezenas de metros) não apresenta a mesma quantidade de feições cársticas que a Formação Furnas. Neste último caso, o relevo apresenta sistemas subterrâneos bem desenvolvidos, no qual as feições cársticas condicionam a circulação da água subterrânea e superficial.

A partir disso, esta pesquisa irá discutir os conceitos e propor nova classificação de região cárstica, província espeleológica e distrito e núcleo cárstico/espeleológico. Uma nova região cárstica brasileira é apresentada, denominada de região cárstica dos Campos Gerais (RCCG). Seu território extrapola os limites do recorte espacial deste trabalho, envolvendo toda a área de afloramento das rochas acima mencionadas, inclusive adentrando o estado de São Paulo.

Há cerca de seis décadas diversos estudos têm discutido a possibilidade de carstificação nas rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha,

apresentando argumentos que sustentam esta hipótese. O pioneiro, considerado uma das referências mais antigas sobre o tema no mundo, é de autoria de Maack (1956). Os estudos de Soares (1989) e Melo e Giannini (2007) abordaram sobre a ocorrência de dissolução de componentes dos arenitos na gênese de feições do relevo da Formação Furnas. Posteriormente, Melo (2010), Pontes (2010), Massuqueto (2010), Melo et al. (2011), Hardt (2011), Flügel Filho (2012), Pontes (2014) e Melo et al. (2015) classificaram o relevo em rochas da Formação Furnas como um típico sistema cárstico, formado em rochas não carbonáticas. Melo (2006), Hardt (2011) e Letenski et al. (2011) descreveram a ocorrência de dissolução na formação das feições do relevo no Arenito Vila Velha (Formação Campo Mourão), caracterizando-os como processos cársticos. Wray (1997) também menciona a ocorrência de estudos nesta unidade abordando carstificação nos arenitos.

Contudo, algumas questões sobre a carstificação nestes arenitos quartzosos permanecem sem resposta. Quais seriam as condições químicas necessárias para a dissolução do quartzo em temperatura ambiente? Qual o tipo de espeleogênese aplica-se nestas unidades geológicas? Qual o papel da água subterrânea na espeleogênese? Como se formam estas feições geológicas consideradas singularidades de origem cárstica, os dutos e alvéolos, por exemplo, são formados em superfície ou em ambiente subterrâneo? Há algum controle na ocorrência das feições geológicas cársticas? As características sedimentares dos arenitos (granulação, porosidade, estruturas sedimentares) influenciam na ocorrência destas feições?

Neste sentido, o objetivo principal da pesquisa é caracterizar as feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas nos arenitos quartzosos da Formação Furnas e subunidade Vila Velha, em exposição no município de Ponta Grossa (PR). Os objetivos específicos da pesquisa são: a) caracterizar processos e entender a gênese da carstificação nestes arenitos, b) definir uma nova região cárstica considerando os novos conceitos e os riscos à conservação do patrimônio geológico cárstico e c) propor ações como medidas de geoconservação alinhadas com as políticas públicas.

A presente pesquisa partiu da seguinte questão: "*as feições de origem cárstica desenvolvidas em rochas areníticas são consideradas nas políticas públicas e nos processos de licenciamento ambiental a fim de garantir a geoconservação deste patrimônio?*". Para responder esta questão é importante identificar quais são

estas singularidades espeleológicas e cársticas, suas características e processos genéticos.

Assim, foram determinados critérios de inventariação, caracterização e valoração do patrimônio geológico cárstico sendo incluídas neste contexto as feições consideradas chave para o enquadramento da região como cárstica, pois são evidências da ação de processos de intemperismo químico na rocha. Além disso, estas geoformas auxiliam na compreensão da espeleogênese na área de estudo.

Com isso, desenvolveu-se um estudo sistemático sobre as feições cársticas existentes em área determinada no município de Ponta Grossa, a fim de testar a hipótese de existência de desenvolvimento de processos de carste em arenitos quartzosos sem cimento carbonático. Após, foi realizada uma análise do atual panorama da gestão do patrimônio geológico em questão e os desafios para a sua geoconservação. Ações que contemplam a proteção da geodiversidade com o desenvolvimento econômico regional são apresentadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo dos processos cársticos passou por significativos avanços nas últimas décadas, principalmente devido ao aumento das explorações dos ambientes subterrâneos (endocarste), refinamento nas pesquisas com análises laboratoriais diversas, e realização de levantamentos sistemáticos nos relevos com ocorrência de feições cársticas. Isto resultou na evolução do conceito de carste, incluindo a possibilidade de sua existência em rochas outrora, consideradas pela literatura, improváveis de desenvolver tais processos.

Contudo, uma parte da própria comunidade científica ainda apresenta resistência a este novo conceito de carste e, consequentemente, com a classificação de carste não carbonático do relevo desenvolvido nas rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha. Ainda é possível encontrar referências sobre o tema em questão com a compreensão de que carste só ocorre em rochas carbonáticas, excluindo a possibilidade de o intemperismo químico ser um processo condicionante na formação de feições e formas de relevos em outros tipos de rochas, a exemplo de quartzoarenitos. Esta falta de compreensão da academia sobre a nova conceituação de carste dificulta a criação de políticas públicas que incluam as

características físicas específicas deste tipo de relevo, afetando diretamente sua geoconservação.

Da mesma forma, esta incompreensão sobre o conceito de carste não carbonático causa ações equivocadas perante os gestores públicos, e medidas importantes de geoconservação não são utilizadas nas áreas de ocorrência destes arenitos quartzosos. Este fato gera incertezas nas ações dos órgãos públicos de licenciamento e fiscalização ambiental, tornando-se fragilizados os procedimentos técnicos e administrativos. O resultado principal é a falta de exigência de estudos técnicos em áreas com feições cársticas em rochas não carbonáticas, fato que vem acontecendo regularmente. A combinação destes fatores deixa em risco a geoconservação do patrimônio geológico cárstico em rochas areníticas, a exemplo da área estudada. A crescente demanda por recursos minerais e energéticos, principalmente o potencial hidrelétrico, a forte expansão do uso do solo com finalidade urbana, agrícola extensiva e de plantio comercial de árvores exóticas e utilização de recursos hídricos, principalmente a explotação de águas subterrâneas, agravam o problema.

Aliado a esta falta de compreensão sobre processos e a necessidade de avanço conceitual sobre o tema, soma-se o fato de que foi a pouco mais de duas décadas que o patrimônio geológico passou a receber mais atenção com o desenvolvimento do conceito de geodiversidade. Este por sua vez, leva à busca da geoconservação. A diversidade de elementos abióticos, assim como a necessidade de sua conservação, ainda é pouco assimilada pelo meio acadêmico e comunidade em geral, principalmente se comparado com a biodiversidade. Exemplos desta baixa visibilidade, e até mesmo da falta de atenção para com os elementos da geodiversidade, ocorre nas unidades de conservação brasileiras, mesmo em áreas protegidas que possuem singular patrimônio geológico, problema relatado por Pereira, Brilha e Martinez (2008) e Moreira (2012).

Ocorrem feições nestas unidades geológicas ainda sem levantamentos sistemáticos sobre seu padrão de desenvolvimento, relação com características sedimentares (composição, granulação e estruturas sedimentares) ou descontinuidades tectônicas, entre outras características que possam sustentar a hipótese aqui apresentada e consolidá-la como um conjunto de processos formadores de um relevo cárstico em rochas não carbonáticas.

Por outro lado, enquanto ocorrem discussões acadêmicas sobre classificar o relevo citado como cárstico ou não, as políticas públicas não abrangem por completo estas áreas, e deixam lacunas na legislação das esferas municipal, estadual e federal. Incluem-se nestes casos os planos de desenvolvimento e ordenamento territorial (Plano Diretor, Plano de Saneamento Básico, Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, entre outros). No estado do Paraná, as áreas de ocorrência do carste arenítico ainda não são incluídas como locais de realização obrigatória de estudos cársticos/espeleológicos de detalhe para processos de licenciamento ambiental de empreendimentos com alto potencial degradador, como usinas hidrelétricas, mineração e aterros sanitários.

As áreas inundadas para construção de hidrelétricas e a exploração de areia por hidrodesmonte e desmonte mecânico são atividades econômicas que geram grandes riscos à geoconservação regional, principalmente devido às diversas falhas existentes nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos e ineficiência na fiscalização dos órgãos competentes (PONTES e MASSUQUETO, 2016). Estas atividades econômicas envolvem elevado risco de supressão de cavidades subterrâneas, afloramentos rochosos e, por consequência, a eliminação de diversas feições de interesse científico que registram a ação de processos cársticos. Acrescenta-se ainda a alta probabilidade de comprometimento dos mananciais de águas subterrâneas, e do patrimônio paleontológico (icnofósseis) e arqueológico (pinturas rupestres e artefatos líticos) que em diversas situações estão associados às cavidades subterrâneas.

O eixo de crescimento da cidade de Ponta Grossa na sua porção leste está avançando sobre a área cárstica da Formação Furnas, o que permite antever o risco iminente de dano ao patrimônio geológico arenítico. Outras cidades vizinhas, situadas na região cárstica dos Campos Gerais, também apresentam expansão urbana rumo a áreas de relevo similar, ou têm sua malha urbana totalmente estabelecida sobre este carste, como é o exemplo dos municípios de Jaguariaíva e Carambeí.

Em tal contexto, compreende-se a ocorrência de problemas geotécnicos nas construções, devido à formação de recalques no relevo (rebaixamentos no terreno). O aquífero freático próximo da superfície, por vezes aflorando em determinados períodos do ano, pode causar danos às estruturas dos imóveis e diversos problemas à vida das pessoas que habitam estes locais. Pontes (2014) identificou dezenas de

depressões no terreno apenas no município de Ponta Grossa, sendo que algumas destas feições de relevo estão na área urbana.

Além disso, Melo (2009) salienta os problemas com relação aos recursos hídricos na área de estudo, mostrando a possibilidade de poluição do Aquífero Furnas como também o comprometimento pela sobrecarga de uso destas águas subterrâneas. O registro de interações intrínsecas entre biodiversidade e geodiversidade e a função geossistêmica deste patrimônio geológico cárstico, sobretudo das cavernas, enquanto locais de recarga de aquífero, justificam a importância de pesquisas, políticas públicas e medidas de geoconservação.

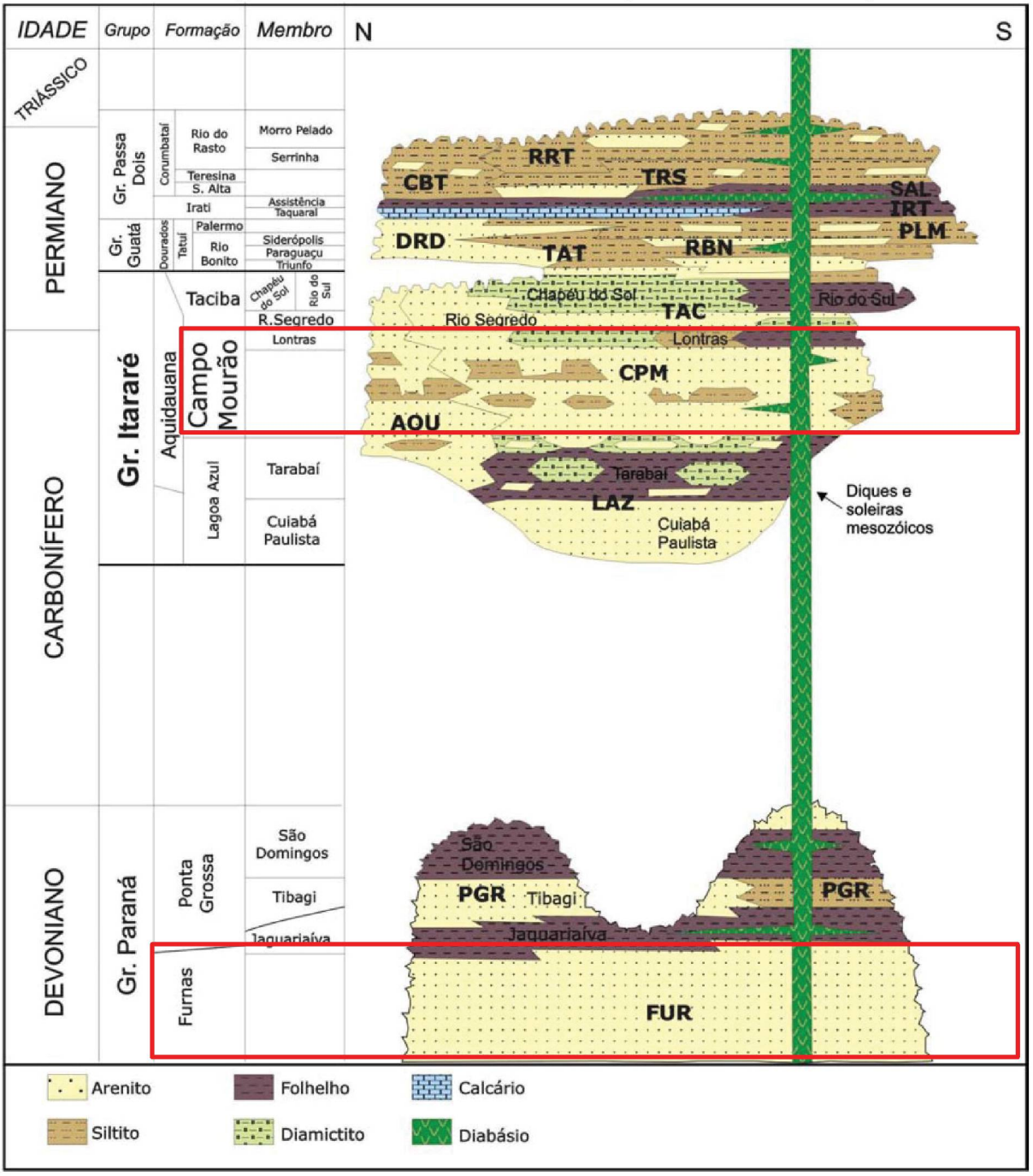
Diante do exposto, considera-se que o estudo sistemático das feições cársticas areníticas é de grande importância. A compreensão dos processos geológicos envolvidos, das geoformas criadas nestas rochas, assim como da fragilidade dos sistemas subterrâneos, pode servir de referência para a revisão da conceituação científica e, por consequência, de políticas públicas e da forma atual de gestão do território existente.

Inventariar e valorar o patrimônio cárstico e espeleológico arenítico do município de Ponta Grossa, estabelecer bases conceituais, caracterizar o carste e suas feições e definir uma nova região cárstica brasileira. Com isso, os resultados deste estudo contribuiram para o avanço do conhecimento dos processos cársticos e sua importância na formação de relevo. Da mesma forma, permitiu apontar medidas para atualização de políticas públicas e procedimentos técnicos, principalmente aqueles voltados para o licenciamento de atividades econômicas de alto potencial degradador, assim como para a revisão de estratégias de manejo e conservação do patrimônio geológico.

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO

Na área estudada afloram quartzoarenitos, sem cimento carbonático, pertencentes à Formação Furnas (Grupo Paraná) e ao Arenito Vila Velha, subunidade da Formação Campo Mourão (Grupo Itararé) (figuras 1.4, 1.5 e 1.6).

FIGURA 1.4 - CARTA ESTRATIGRÁFICA DAS SEQUÊNCIAS SILURO-DEVONIANA E PERMOCARBONÍFERA DA BACIA DO PARANÁ, COM DESTAQUE (EM VERMELHO) DAS FORMAÇÕES FURNAS E CAMPO MOURÃO (ARENITO VILA VELHA).



FONTE: modificado de MILANI (1994) e MINEROPAR (2007).

FIGURA 1.5 - PAREDÕES ROCHOSOS DA FORMAÇÃO FURNAS NA ÁREA DE ESTUDO, LOCAL DENOMINADO DE SETOR MACARRÃO.

FIGURA 1.6 - FAMOSAS FORMAS RUINIFORMES DO ARENITO VILA VELHA, NO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.

Os sedimentos constituintes dos arenitos da Formação Furnas foram acumulados entre o final do Siluriano e o início do Devoniano, entre 421 e 395 milhões de anos (ASSINE, 1996; GUIMARÃES et al., 2007, MILANI et al., 2007). A caracterização e posição estratigráfica desta formação foi proposta por Petri (1948) e reformulada por Bigarella, Salamuni e Marques Filho (1966).

O nome Furnas foi utilizado pela primeira vez por Oliveira (1912), de acordo com Souza e Souza (2004), que denominou a unidade de *grès* de Furnas. Tratava-se de uma referência aos arenitos devonianos presentes nas escarpas da Serra das Furnas, na região de Itapeva, em São Paulo. No Paraná, esta escarpa era denominada de Serrinha, a oeste de Campo Largo (atual Serra de São Luiz do Purunã) e Serra de Itaiacoca em Ponta Grossa. Atualmente, a Serra de Furnas é conhecida como Escarpa Devoniana, que constitui o desnível topográfico que separa o Primeiro do Segundo Planalto Paranaense.

Esta unidade geológica é constituída dominantemente de arenitos quartzosos de cor branca, cimentados pelos argilominerais caulinita e illita. Inclui também estratos conglomeráticos, principalmente na base, e intercalações de espessuras centimétricas a decimétricas de estratos siltico-argilosos.

Os arenitos estão dispostos em camadas de espessuras de 0,5 a 5 metros de forma tabular, lenticular e cuneiforme, exibindo marcante estratificação cruzada tabular, tangencial na base ou acanalada (ASSINE, 1996). Este autor propôs uma subdivisão da Formação Furnas em três unidades: inferior, média e superior. Lobato e Borghi (2005) propuseram uma subdivisão desta unidade geológica em quatro intervalos específicos, destacando que o intervalo II é subdividido em A e B.

Para Bergamaschi (1992) e Assine, Soares e Milani (1994) esta unidade foi depositada em condições associadas à fácies deltaicas e marinhas plataformais. Com base em registros dos icnogêneros *Rusophycus* e *Cruziana*, traços fósseis atribuídos a trilobitas, Assine (1996) atribuiu um ambiente marinho de deposição para os sedimentos das camadas que ocorrem estes icnofósseis. Milani et al. (2007) relataram ainda que esta unidade geológica exibe característica assinatura transgressiva devido as rochas pelíticas da base da Formação Ponta Grossa sobrepostas aos arenitos plataformais da Formação Furnas.

Ainda há discussão sobre a natureza da sedimentação da Formação Furnas, se marinha ou continental e de sua idade, principalmente de sua porção inferior conglomerática e afossilífera (MILANI et al., 2007). Alguns autores atribuem o

ambiente de deposição da Formação Furnas a paleocanais anastomosados (SCHNEIDER et al., 1974; ZALAN et al., 1987), como também associado a um grande sistema deposicional fluvial de rio entrelaçado (PAVAN, 2015; ARAÚJO, 2016).

O Arenito Vila Velha é uma subunidade pertencente à Formação Campo Mourão (Grupo Itararé) e assenta concordantemente a diamictitos, ritmitos, argilitos e folhelhos pertencentes ao mesmo Grupo. Esta subunidade constitui-se essencialmente por arenitos avermelhados com cimento predominantemente ferruginoso, seleção variável, de granulação fina a grossa, com intercalações seixosas na parte basal. Maack (1946) descreveu como constituintes destes arenitos: quartzo, feldspatos (em parte caulinizados), moscovita, clorita e granada. No entanto, Melo e Coimbra (1996) e Melo et al. (2007) salientam que estes minerais ocorrem em horizontes abaixo dos arenitos mais típicos de Vila Velha, sendo este litotipo constituído unicamente por arenitos quartzosos, com alguns grãos policristalinos (de quartzito) e fragmentos líticos de lamitos arenosos, os quais, deformados por esmagamento, assumem um papel de pseudomatriz.

Maack (1946a e 1946b) foi quem denominou de “Arenito Vila Velha” os arenitos avermelhados, os quais formam morros testemunhos em forma de platôs, onde desenvolvem as famosas esculturas naturais do Parque Estadual de Vila Velha. Conforme França, Winter e Assine (1996) estes platôs apresentam espessuras máximas de cerca de 30 metros e extensão lateral de centenas a mais de mil metros. A espessura total do Arenito Vila Velha é controversa. Melo et al. (2007) apontaram espessura de 50 metros e Maack (1946) considerou 65 metros. Vesely (2011) considerou os valores indicados por Maack (1946) e incluiu um intervalo arenítico com 30 metros de espessura, denominado de arenitos basais, totalizando 95 metros de espessura.

O Grupo Itararé, do qual o Arenito Vila Velha faz parte, foi subdividido nas formações Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul por Schneider et al. (1974). França e Potter (1988) apresentaram uma subdivisão diferente, nas formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba, classificação adotada neste estudo. Para Vesely et al. (2003) e Vesely e Assine (2004) a Formação Campo Mourão possui quatro unidades litoestratigráficas, denominadas da base para o topo de A, B, C e D. Para os autores, o conjunto formado pelas unidades C e D equivalem ao arenito Vila

Velha e representa um ciclo transgressivo-regressivo de 3ª ordem na base da Formação Campo Mourão.

Maack (1946), Melo e Coimbra (1996), França, Winter e Assine (1996) e Melo et al. (2007) relatam que estes arenitos apresentam estratificação incipiente, frequente aspecto maciço, estratificações cruzadas de baixo ângulo, marcas onduladas e presença de intraclastos argilosos.

Milani, França e Schneider (1994) atribuem ao Grupo Itararé ambientes de sedimentação flúvio-glaciais, glacio-marinhas e marinhas, em consequência do degelo de geleiras desenvolvidas sobre extensa área da margem meridional do *Gondwana*.

França, Winter e Assine (1996) consideraram o Arenito Vila Velha como integrante de lobos subaquosos, formados como produtos de fluxos gravitacionais densos iniciados na base de geleiras. Os autores salientam que evidências de influência de correntes hidrodinâmicas apontam ambiente raso, com alternância de fluxos gravitacionais e processos hidrodinâmicos. O Arenito Lapa, que aparece com morfologia linear ao sul de Vila Velha foi interpretado como resultado de preenchimento de canal subaquoso alimentador dos lobos do Arenito Vila Velha (FRANÇA, WINTER e ASSINE, 1996).

Canuto, Rocha-Campos e Sato (1997) descreveram estratificações cruzadas de baixo ângulo e perfurações verticais e horizontais, interpretando-as como resultado de sedimentação marinha rasa, sob influência de marés. Mais recentemente, Vesely (2011), a partir da identificação de superfície contendo sulcos e cristas glaciais dentro da sucessão estratigráfica denominada Arenito Vila Velha, sugere a passagem de gelo sobre sedimentos não consolidados, caracterizando assim um ambiente proglacial.

A idade do Arenito Vila Velha é Westphaliana (Carbonífero Superior), enquadramento baseado em estudos do conteúdo fossilífero de folhelhos incluídos no Arenito Lapa e pela correlação com os sedimentos sotopostos da Formação Lagoa Azul, este último que também apresenta idade Westphaliana (MILANI, FRANÇA e SCHNEIDER, 1994).

As rochas da Formação Furnas e do Arenito Vila Velha apresentam-se intensamente falhadas e fraturadas, registros de sobreposição de diferentes eventos tectônicos da história geológica regional. Duas direções principais de lineamentos estruturais se destacam, relacionadas com o Arco de Ponta Grossa (NW-SE) e com

falhas do embasamento proterozoico (NE-SW), reativado pelo arqueamento crustal durante o Mesozoico. Estas estruturas tectônicas desempenharam importante controle na configuração do relevo nas áreas de exposição destas rochas. O arcabouço estrutural está diretamente associado com a ocorrência de inúmeros *canyons* e fendas superficiais, e estas descontinuidades são zonas preferenciais para a formação de dutos, galerias subterrâneas e demais feições cársticas.

1.4 CARSTE EM ARENITOS NÃO CARBONÁTICOS: CARSTIFICAÇÃO POR *FANTOMIZAÇÃO E ARENIZAÇÃO*

Em rochas areníticas, sem componentes carbonáticos, há registros de feições cársticas. Relevos desenvolvidos em terrenos com este tipo de rocha também podem ser classificados como sistemas cársticos. O presente trabalho conceitua relevo cárstico como uma área geograficamente delimitada onde ocorre um conjunto de feições cársticas características. Já um sistema cárstico é classificado como um tipo de relevo onde há uma organização espacial das feições cársticas, se comportando de maneira conectada, condicionando a circulação das águas subterrâneas e superficiais.

Ao longo de mais de seis décadas, estudos publicados discutiram a existência de processos cársticos em arenitos não carbonáticos, em diferentes partes do mundo. Dentre estes estudos, a mais antiga contribuição é a de Renault (1953) em arenitos com cimentação silicosa na divisa entre a Argélia e o Níger. Maack (1956) e posteriormente Soares (1988; 1989), Melo e Giannini (2007), Pontes (2010), Massuqueto (2010), Melo (2010), Melo et al. (2011), Hardt (2011), Flügel Filho (2012), Pontes (2014) e Melo et al. (2015) desenvolveram estudos em arenitos da Formação Furnas no sul do Brasil; Wernick, Pastore e Pires Neto (1973) abordaram feições cársticas em arenitos de Rio Claro (São Paulo), no Sudeste do Brasil. Jennings (1983), Young (1986) e Wray (2003 e 2009) estudaram arenitos australianos; Urbani (1990) realizou estudos em metarenitos siliciclásticos dos *Tepuis* venezuelanos; Sponholz (1994) estudou arenitos do Níger, Striebel (1997) na Europa Central e Shade (2002) em arenitos de Minnesota nos Estados Unidos. Willems et al. (2008) investigou rochas areníticas em Minas Gerais, Sudeste do Brasil. Melo (2006) e Hardt (2011) estudaram o Arenito Vila Velha, no município de Ponta Grossa, Sul do Brasil. Hardt (2011) mostrou processos cársticos em arenitos

na região de *Forêt de Fontainebleau* na França e na Serra do Itaqueri (São Paulo) e Chapada dos Guimarães (Mato Grosso) no Brasil. Budny (2002) e Budny (2004) apresentou importante registro de cavernas desenvolvidas nos arenitos da Formação Botucatu (Paraná), incluindo cavidades com impressionantes dutos de dissolução, canais de teto (*half-tubes*) e alimentadores (*feeders*).

Um importante trabalho de revisão bibliográfica, que aborda a ocorrência de feições cársticas em arenitos quartzosos foi realizado por Wray (1997), que relatou 26 ocorrências distribuídas em 18 países. Nova revisão foi apresentada por Wray e Sauro (2017) indicando 35 registros distribuídos em 22 países.

No Brasil há vários outros registros de feições cársticas em diversas regiões onde ocorrem afloramentos de arenitos quartzosos, a exemplo das formações Botucatu e Pirambóia, nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, formações Maecuru, Curuá e Alter do Chão no Pará, formações Alto Garças e Vila Maria no Mato Grosso e Formação Nhamundá no Amazonas.

Além de artigos de abordagens específicas sobre carste em arenitos não carbonáticos, há outros estudos de abordagem de carste em rochas sem constituição carbonática, tais como as contribuições de White, Jefferson e Haman (1966), Mainguet (1972), Marescaux (1973), Martini (1979), Young (1988), Galan e Lagarde (1988), Corrêa Neto e Baptista Filho (1997), Willems (2000), Hardt (2003), Bruxelles, Quinif e Wiénin (2009) e Hardt e Rodet (2012).

A simples ocorrência de feições cársticas não caracteriza uma região como de relevo cárstico. Há cavernas desenvolvidas em rochas graníticas que apresentam pequenos espeleotemas, porém são feições isoladas, além de serem cavidades nas quais a gênese não está relacionada a processos de dissolução. Neste caso não se trata de um relevo cárstico, mas apenas de formação de pequenas feições cársticas.

Klimchouck e Ford (2000) definiram carste como sendo um sistema de transferência de material integrado, em rochas solúveis, com permeabilidade estrutural dominada por condutos estabelecidos pela dissolução do material rochoso e organizado para facilitar a circulação de fluidos. Neste estudo, amplia-se o conceito acima ao se considerar o relevo cárstico também como uma área geograficamente delimitada, que possui um conjunto de feições cársticas organizadas espacialmente (sistema cárstico), onde o intemperismo químico é

condicionante na gênese destas feições, independente de qual for o substrato geológico.

O conceito de carste passou por importantes transformações no meio científico nas últimas décadas, e novos modelos carstogenéticos surgiram. Dentre eles está o processo de carstificação desenvolvido em dois momentos, um onde o intemperismo químico é ativo, formando porções de alteração na rocha sem a presença de vazios, e um segundo momento onde processos hidrológicos de maior energia entram em ação e tem início a formação de cavidades subterrâneas.

Este processo, que envolve a dissolução de componentes da rocha *in situ* em ambiente subterrâneo e posterior remoção mecânica do material alterado, recebeu diferentes designações, entre diversos autores que tem investigado sobre este tema. Contudo, a abordagem de todos os pesquisadores revela que as concepções genéticas são similares, diferindo apenas nos processos e produtos resultantes.

Rodet (1996), Hardt e Rodet (2012) e Rodet (2014) denominaram este processo de primocarste e o produto gerado como *alterita*. Vergari e Quinif (1997), Quinif (1999), Kaufmann et al., (1999), Laverty (2012), Häuselmann e Tognini (2005) e Bruxelles, Quinif e Wiénin (2009) nomearam o processo de fantomização e o produto de *rocha fantasma*. Recentemente, Quinif et al. (2014) passaram a tratar os processos como *teoria da carstificação fantasma* (*Ghost-karstification theory*).

O termo *alterita* é comumente utilizado em diversas áreas da geologia para se definir tipos diferentes de materiais, tornando-se um conceito impreciso, de caráter generalista. Por outro lado, o conceito *rocha fantasma* soa informal e representa, na interpretação literal do termo, uma rocha que não existe ou que não é visível. Neste estudo adotou-se o conceito rocha fantomizada para se referir ao produto da carstificação por fantomização, conforme apontaram Wray e Sauro (2017).

Rodet (1996), pioneiro sobre este modelo, em seu trabalho intitulado *Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies: le labyrinth d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France)* identificou redes de rocha intemperizada em sistema de caverna labiríntica, mostrando que estas áreas de alteração são frentes de intemperismos e erosão, com consequente desenvolvimento do sistema subterrâneo. Quinif (1999) também

utilizou do mesmo modelo genético para explicar a carstogênese em áreas calcárias, apenas mudando as designações dos conceitos.

Atualmente verifica-se tendência à adoção da designação processo de fantomização para identificar a carstogênese e espeleogênese, como em estudos realizados na Suíça por Häuselmann e Tognini (2005), na França por Dubois et al. (2011), Quinif et al. (2014), Courreges-Blanc e Maire (2014) e Dandurand et al. (2014); na Bélgica por Kaufmann et al., (1999), Laverty (2012), Quinif et al. (2014), Kaufmann e Deceuster (2014) e Dewaide et al. (2014); nas Ilhas Britânicas por Rowberry et al. (2014); na Espanha por Laverty (2012) e na Itália por Dubois et al. (2014). Porém, todos estes trabalhos são desenvolvidos em áreas sobre rochas carbonáticas.

Hardt, Rodet e Pinto (2013), Pontes (2014), Vasconcelos (2014) e Rodet (2014) aplicaram este modelo carstogenético para rochas areníticas siliciclásticas, baseando-se na identificação de rocha fantomizada em cavernas. Häuselmann e Tognini (2005) apresentaram carstificação por fantomização na *Kaltbach Cave*, na Suíça e Quinif e Bruxelles (2011) salientaram que há vários exemplos deste processo no mundo (Europa, Estados Unidos, China, África do Sul e Venezuela), desenvolvendo-se em rochas carbonáticas e não carbonáticas.

Martini (1979; 1982) e Jennings (1983) denominaram o processo de carstificação de rochas areníticas e quartzíticas com cimentação de sílica (principalmente sobrecrescimento de grãos de quartzo) de arenização. Em recentes trabalhos em quartzoarenitos, Sauro (2014) e Melo et al. (2015) mostram que a arenização envolve os mesmos princípios genéticos presentes no processo de fantomização. Contudo, Wray e Sauro (2017) em recente revisão e atualização sobre processos e formas de intemperismo em quartzoarenitos e quartzitos, apontaram que no processo de arenização, a rocha deve ser essencialmente composta por quartzo (monominerálica), arcabouço e cimento quartzoso, e apenas uma fração dos grãos de quartzo é removida por dissolução, restando uma rocha com alta porosidade e até mesmo areia completamente solta. Ao contrário, os autores apontam que o processo de fantomização envolve casos onde a rocha apresenta composição poliminerálica, que compreende componentes mais solúveis, que são dissolvidos, e deixam minerais residuais menos solúveis preservados. Nesta interpretação, as rochas que apresentam outros componentes como cimento,

que não sejam silicosos, teoricamente não se enquadrariam no modelo da arenização.

Esta pesquisa considerou a carstogênese por primocarste como um modelo que inclui dois processos, a fantomização e arenização, conforme resume o quadro 1.1. Esta classificação é semelhante à apresentada por Wray e Sauro (2017), contudo, entende-se que a arenização pode ocorrer em rochas polimineralicas que incluam cimentação de sílica, desde que o intemperismo químico tenha atuado neste cimento.

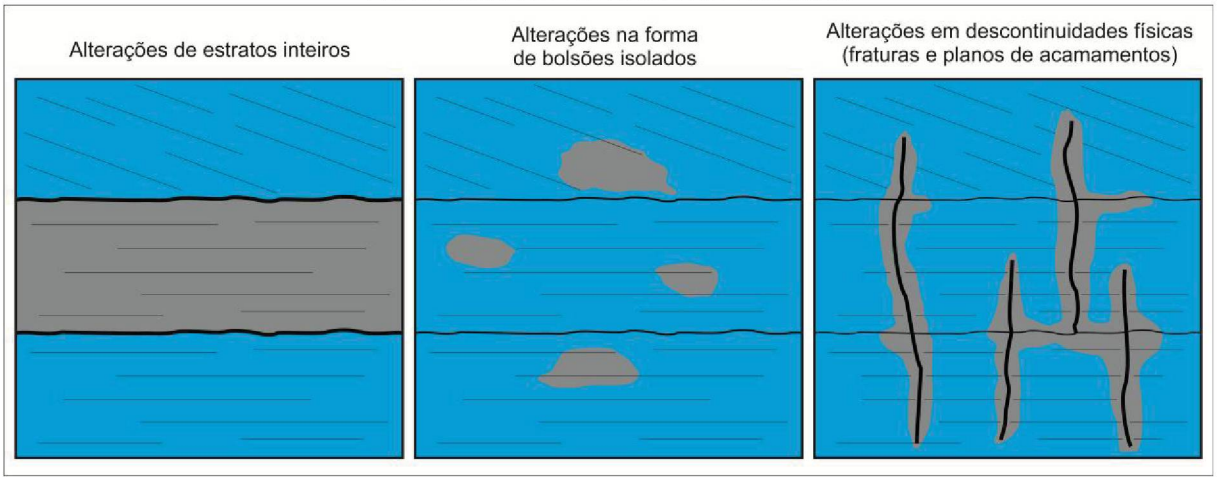
QUADRO 1.1 - MODELO CARSTOGENÉTICO DE PRIMOCARSTE E SITUAÇÕES PARA O SEU DESENVOLVIMENTO.

Modelo carstogenético	Primocarste			
Classificação	Carstificação por remoção parcial (processo em dois momentos – intemperismo químico + remoção mecânica)			
Composição das rochas	Poliminerálica		Monominerálica (quartzosa) ou em casos com presença de cimentação silicosa	
Condições	Intemperismo químico de materiais mais solúveis		Intemperismo químico de cimento silicoso	
Tipos de processos	Fantomização		Arenização	
Produtos	Rocha fantomizada	Com alteração volumétrica	Rocha arenizada	Sem subdivisões
		Isovolumétrica		

Assim, o primocarste é uma concepção diferente da carstogênese clássica, com uma alteração em que ocorre a lixiviação de minerais solúveis e conservação *in situ* de materiais menos solúveis (residuais). Uma determinada rocha pode passar por ambos os processos, fantomização e arenização. A rocha arenizada e/ou fantomizada pode se formar a partir de estratos, juntas e em bolsões isolados, em pequenas ou grandes porções (centimétricas a métricas) (figura 1.7). Ao contrário do carste tradicional, o volume inicialmente criado por dissolução se manifesta como poros distribuídos em toda a rocha alterada (QUINIF, 1999). Laverty (2012) também apresenta o processo de substituição que pode ocorrer no processo de carstificação por fantomização, ou seja, a substituição é o surgimento de outro mineral de

estrutura ou composição química diferente a partir de um mineral preexistente. Como exemplo, o caso de rochas calcárias em que parte de seus componentes pode ser substituído por argilominerais autigênicos.

FIGURA 1.7 - DIFERENTES TIPOS DE OCORRÊNCIA DE ROCHA ARENIZADA E/OU FANTOMIZADA NA ÁREA DE ESTUDO.



A alteração da rocha é um estágio inicial do carste que ocorre em profundidade, em zonas freáticas, ambientes com pouca energia, onde processos hidrológicos de maior energia não afetam a estrutura original. Assim, ocorre a remoção de material dissolvido por fluxo freático lento, sendo preservada a aparência visual da rocha (estratificação, granulação, acamamento) com relação ao seu entorno inalterado (RODET, 1996; VERGARI e QUINIF, 1997; QUINIF, 1999).

Quando o nível freático rebaixa, a água que antes ocupava os poros da rocha desocupa estes espaços e o material resultante deste processo pode perder a sustentação devido ao rearranjo entre os grãos, resultado da lixiviação do cimento. Há casos em que a progressão na alteração ainda em ambiente freático pode resultar na alteração do volume da rocha arenizada e/ou fantomizada. Nestas duas condições, o material alterado pode perder o suporte devido ao rearranjo entre os grãos, surgindo um vazio no topo do material alterado, resultando na rocha arenizada e/ou fantomizada com mudança volumétrica (denominado de *aloalterita* por RODET, 1996). O mesmo autor entende que quando a rocha é inteiramente alterada, mas não ocorre o colapso, mantendo as suas características físicas, obtém-se um material de identidade própria, a isoalterita, ou seja, uma rocha arenizada e/ou fantomizada isovolumétrica. Se um novo processo hidrológico de maior energia se estabelece, esta adição de energia pode contribuir para a remoção

do material que foi alterado, levando ao desenvolvimento da carstogênese tradicional (RODET, 1996; 2017).

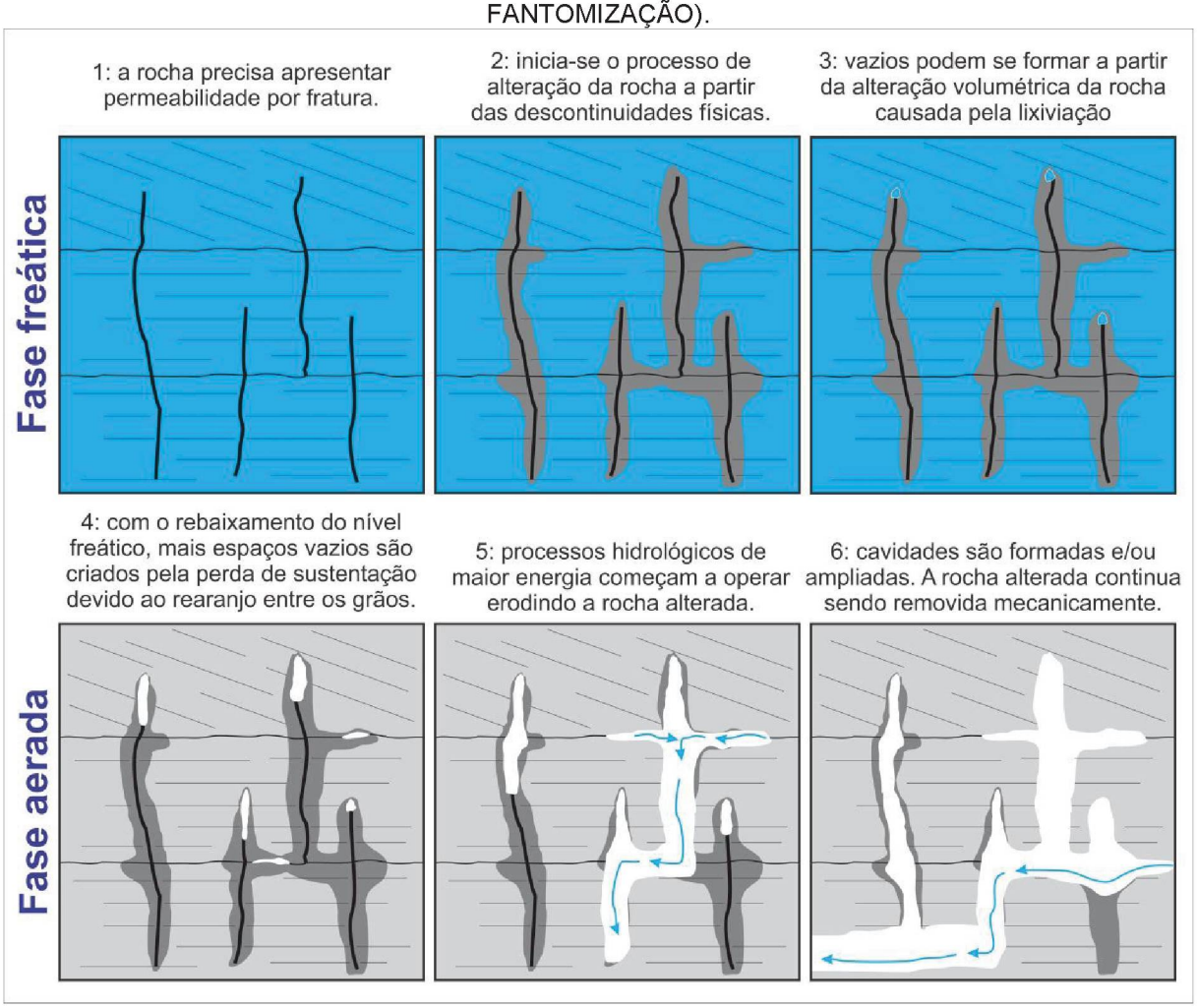
Na prática, as rochas arenizadas e fantomizadas consistem em materiais geralmente pouco coesos, com cor diferente da rocha original (sã). Em uma primeira análise, estas alerações *in situ* podem ser confundidas com depósitos de sedimentos alóctones. No entanto, características como a manutenção de estratificação original da rocha, mesmo nas porções alteradas e a composição mineralógica, são fatores que determinam a identificação desta feição. Rodet (1996) mostra que não se trata, portanto, de aluviões, de um preenchimento de determinado conduto por material exógeno, mas da transformação *in situ*, pela alteração da rocha encaixante, ao longo de fraturas e estruturas sedimentares.

O primocarste (carstificação por fantomização ou arenização) tem três fases, sendo elas: 1) a rocha é quimicamente alterada *in situ*, em ambiente freático com fluxo lento e baixa energia. Minerais mais solúveis dissolvem-se e os resistentes permanecem na posição sedimentar original. Esse processo tende a se formar em zonas de descontinuidades ou anisotropias, como estratificações, planos de acamamento e estruturas rúpteis; 2) devido à criação de espaço pela lixiviação parcial de cimentos e grãos de minerais mais instáveis, o material alterado pode perder o suporte devido ao rearranjo entre os grãos, formando rochas arenizadas e/ou fantomizadas com alteração volumétrica. O rebaixamento do nível freático pode acelerar este processo. Quando a rocha alterada não colapsa em espaços criados pela lixiviação, assume característica isovolumétrica; 3) processos hidrológicos de maior energia são introduzidos e a ação das águas superficiais e subsuperficiais atuam, aumentando a remoção de partículas do arcabouço da rocha. Nesta fase os condutos são formados, fraturas e passagens são ampliadas e cavernas são desenvolvidas. Em alguns casos, a zona epifreática pode contribuir para a remoção da rocha intemperizada *in situ* após a fase um. A oscilação no nível da água freática pode auxiliar na desagregação do material, tornando a rocha arenizada e/ou fantomizada mais suscetível a processos de erosão (figura 1.8).

Conforme já salientado, as rochas da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha apresentam feições geológicas típicas de áreas cársticas. Há registro de arenização e fantomização nas rochas da Formação Furnas (principalmente rochas com alteração isovolumétrica) (MELO e GIANNINI, 2007; PONTES, 2014), possibilitando afirmar a ocorrência de primocarste e a classificação da área em

questão como uma região cárstica não carbonática. Hardt (2011) também identificou rocha fantomizada no Arenito Vila Velha, atribuindo o mesmo processo na gênese das feições cársticas nesta rocha. O trabalho de Pontes (2014) indicou que há uma organização espacial na ocorrência de cavernas, dolinas e depressões no terreno e no controle do fluxo de águas subterrâneas, tornando passível de classificar este relevo como um sistema cárstico.

FIGURA 1.8 - ESQUEMA EXPLICATIVO DAS ETAPAS DO PRIMOCARSTE (ARENIZAÇÃO E FANTOMIZAÇÃO).



Hardt (2011) trouxe importantes contribuições no que diz respeito à classificação de carste e indicou a necessidade de alterar este conceito no que se refere ao uso restrito do processo de dissolução química para definição deste tipo de relevo. O autor propôs o uso do conceito de intemperismo químico, por ser mais abrangente. Isso possibilita classificar como carste os casos que envolvam alteração química da rocha *in situ* e posterior remoção mecânica, incluindo assim, aqueles

relevos que apresentem os mesmos tipos de sistemas e funcionamento se comparado aos típicos sistemas cársticos carbonáticos.

1.5 INTEMPERISMO QUÍMICO DO CIMENTO (CAULINITA E ÓXIDO DE FERRO) E DO ARCABOUÇO QUARTZOSO

O intemperismo, ou meteorização, é o processo de decomposição das rochas, capaz de alterar sua estrutura e composição mineral, podendo ser de natureza química, física e biológica. O intemperismo químico envolve reações químicas do ar e da água com minerais que compõem as rochas (PRESS et al., 2006).

Conforme Toledo, Oliveira e Mellfi (2000), na maior parte dos ambientes da superfície terrestre as águas apresentam pH entre 5 e 9, e as principais reações do intemperismo químico nestas condições são hidratação, dissolução, hidrólise e oxidação. Os autores destacam que quando o pH é inferior a 5 a reação predominante é a acidólise. A maioria das reações de dissolução depende das interações entre os íons na superfície do mineral e essas interações de superfície envolvem grupos oxi-hidróxidos H^+ e OH^- e ligantes como ânions e ácidos fracos, que dominam as reações de dissolução (MARTINS, MARTINS e REATTO, 2004).

A dissolução é um processo complexo que envolve muitas variáveis, tais como composição das soluções intempéricas, temperatura, pH, características da superfície e composição do mineral. Berner (1978) salienta que há três mecanismos de dissolução dos minerais, sendo: transporte de soluto do cristal dissolvido, desprendimento de íons e moléculas da superfície do cristal ou a combinação dos dois mecanismos. No primeiro caso, a liberação dos íons ocorre rapidamente e a solução torna-se saturada e no caso de desprendimento de íons e moléculas, o processo é muito lento.

No processo de carstificação, seja em rochas carbonáticas ou não, a dissolução dos minerais nem sempre é completa. Assim, se os processos de intemperismo químico não resultaram na remoção total da rocha e de seus minerais constituintes, mas sua atuação foi importante, sobretudo na forma de dissolução, tem-se um processo cárstico. Afinal, como salientam Dubois et al. (2014), a carstificação pode envolver tanto remoção parcial como total.

Os arcabouços dos arenitos da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha é essencialmente de composição quartzosa, cimentados por caulinita e óxidos de ferro, respectivamente. Conforme Melo et al. (2015) a caulinita é bem menos solúvel do que minerais carbonáticos, porém é mais instável do que o quartzo. Já os óxidos de ferro, conforme mostra Goldich (1938), são considerados mais estáveis frente ao processo de intemperismo químico do que o próprio quartzo.

Nestes casos específicos, o intemperismo químico é mais lento, mas não pode ser considerado insignificante. A presença de feições geológicas típicas de ambientes cársticos indicam processos que envolveram intemperismo químico, não apenas intemperismo físico, com ação mecânica.

A dissolução da caulinita ocorre principalmente a partir da ação de ácidos orgânicos, principalmente o oxálico ($H_2C_2O_4$), produzido a partir da degradação de certas plantas. Mas também há outros fatores que podem influenciar, tais como temperatura, o movimento de percolação da água, cristalinidade do mineral, teor de alumínio e bactérias aeróbicas. (SUTHEIMER, MAURICE e ZHOU, 1999; METZ e GANOR, 2001; MAURICE et al., 2001; CAMA, METZ e GANOR, 2002; GANOR e LASAGA, 2005; CAMA e GANOR, 2006; MELO e GIANNINI, 2007).

Conforme Schott e Oelkers (1995) a dissolução da caulinita por fluído ácido tem a seguinte equação química:

$$\mathbf{AlSiO_{5/2}(OH)_2 + 3H^+ \Leftrightarrow Al_{3+} + (SiO_{2-}\, nH_2O)^* + (5/2 - n)H_2O}$$

A corrosão do quartzo causada por intemperismo químico é um fato presente em muitas rochas, principalmente em regiões tropicais e subtropicais, onde a disponibilidade hídrica é grande. O tempo de exposição às intempéries também é um fator condicionante, pois como se trata de um mineral de baixa solubilidade, quanto maior for o tempo de sua exposição aos agentes da natureza, maior será sua alteração.

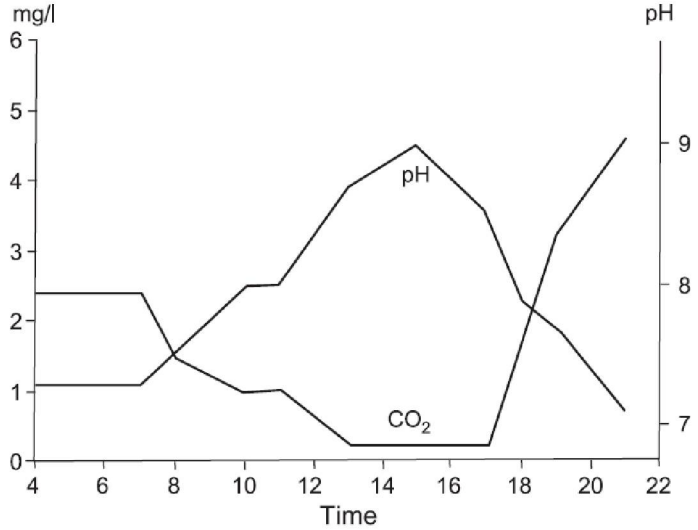
No entanto, a literatura mostra que o quartzo dissolve em condições onde o pH é muito elevado (básico), só podendo ocorrer dissolução deste mineral em soluções ácidas em ambientes de alta temperatura como, por exemplo, em locais com hidrotermalismo. Então, a principal questão neste caso é explicar quais são as condições químicas que possibilitam a dissolução dos grãos de quartzo do arcabouço dos arenitos Furnas e Vila Velha.

Os solos, águas subterrâneas e superficiais nas rochas da Formação Furnas (SILVA e MIGLIORINIE, 2014) e especificamente no município de Ponta Grossa (BARRETO, 2016) tendem a ser ácidos e não há hidrotermalismo na região. Estas informações refutam a hipótese de ambiente ácido em altas temperaturas, mas abre espaço para a hipótese de condições de alta alcalinidade em temperatura ambiente. No entanto, esta situação não se coaduna com os dados de pH das águas regionais, ácidas.

Porém, é importante destacar que micro-organismos podem alterar totalmente as condições químicas em determinados pontos da rocha, em escala de microambientes, possibilitando a dissolução da sílica conforme apontaram Bennet (1991), Ehrlich (1996), Büdel et al. (2004), Brehm, Gorbushina e Mottershead (2005), Romaní e Rodriguez (2007) e Miot, Benzerara e Kappler (2014).

A partir de análises microscópicas em um cristal de quartzo de um ambiente de meteorização nos *Tepuis* venezuelanos, Brehm, Gorbushina e Mottershead (2005) constataram que colônias de micro-organismos, formando biofilmes, podem criar uma alteração local no pH de 3,4 (valor da água nos *Tepuis*) para valores maiores que 9, proporcionando as condições necessárias para a dissolução do quartzo, conforme apontado por Dove e Rimstidt (1994). Além disso, os autores encontraram clara evidência da capacidade de micro-organismos dissolverem e fragmentarem o quartzo, pois a associação da atividade fotossintética e o consumo de CO_2 aumentam o pH em microambientes no entorno da célula (figura 1.9).

FIGURA 1.9 - TAXAS DE DISSOLUÇÃO DO QUARTZO EXPRESSAS EM FUNÇÃO DO PH E DO CONSUMO DE CO_2 ASSOCIADO À ATIVIDADE FOTOSSINTÉTICA.



FONTE: Brehm, Gorbushina e Mottershead (2005).

Decho (2000) verificou a capacidade de bactérias heterotróficas, em comunidades microbianas, de transportarem íons e contribuirem para o processo de dissolução. No entanto a energia de ativação necessária para quebrar as ligações Si-O é alta.

Segundo Rosa (2014) a dissolução da sílica ocorre por meio de uma reação de hidrólise, expressa pela equação química a seguir:

$$\mathbf{SiO_2 + 2H_2O = Si(OH)_4}$$

No entanto, conforme aponta Iler (1979), a dissolução da sílica em meio aquoso está relacionada à hidratação pelos íons OH^-, tendo a seguinte equação química:

$$\mathbf{(SiO_2)x + 2H_2O\ (SiO_2) \leftrightarrows \underline{Hidratação/Desidratação} \leftrightarrows (SiO_2)x - 1 + Si(OH)_4}$$

A hidrólise é a mais importante reação na lixiviação e segundo Hijazin, Simões e Silveira (2010) é uma reação química em meio aquoso, na qual a água passa por dupla decomposição em um composto, onde um hidrogênio da molécula de água é transferido para um dos produtos, e o grupo OH é transferido para outro produto.

No caso da dissolução dos óxidos de ferro, que segundo Goldich (1938) são considerados mais estáveis do que o próprio quartzo, alguns autores apontam sobre a contribuição de sideróforos na solubilidade e na cinética de dissolução destes minerais (HERSMAN, LLOYD e SPOSITO, 1995; HERSMAN, 2000 e KRAEMER, 2004). Conforme Benite, Machado e Machado (2002) os sideróforos são compostos orgânicos elaborados por micro-organismos capazes de solubilizar o ferro, sendo definidos como agentes helicoidais específicos de íons ferrosos de baixo peso molecular.

Panias et al. (1996) e Lee et al. (2007) relatam a possibilidade de dissolução do óxido de ferro por ácido oxálico ($H_2C_2O_4$), processo químico que ocorre em pH entre 2,5 a 3,0. De acordo com os experimentos desenvolvidos por Taxiarchou et al. (1997), a dissolução do ferro é altamente dependente da temperatura e do pH da solução, enquanto é praticamente independente da concentração total do ácido

oxálico. Os autores também constataram que a dissolução é mais rápida numa atmosfera inerte sob a luz visível, sendo que em ambiente escuro e em uma atmosfera oxidante, o processo de dissolução é mais lento.

Existem três reações principais pelas quais os óxidos de ferro podem ser dissolvidos (SCHWERTMANN, 1991): protonação, redução e complexação. As respectivas equações químicas são as seguintes:

$$\mathbf{FeOOH + H^+ \rightarrow Fe(OH)_2}$$

$$\mathbf{FeOOH + e^- + 3H^+ \rightarrow Fe^{2+} + 2H_2O}$$

$$\mathbf{FeOOH + nL^- + 3H^+ \rightarrow [FeL_n]^{3-n} + 2H_2O \ (L = ligante)}$$

Schwertmann (1991) salientou que ânions orgânicos, como o oxalato, que são adsorvidos na superfície, podem enfraquecer as ligações Fe^{3+} −O e assim aumentar a dissolução redutora.

Conforme anteriormente apresentado, existem condições ambientais e químicas para o intemperismo químico dos minerais constituintes dos arenitos da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha. As dissoluções do quartzo e do óxido de ferro são mais lentas se comparado a da caulinita, mas o tempo de exposição e características climáticas regionais (subtropical úmido com elevada disponibilidade hídrica) possibilitam significativo ataque químico nestes minerais.

A identificação do processo de intemperismo químico nestas rochas é fundamental para a classificação de carste e, portanto, é uma informação importante frente aos diferentes tipos de uso do solo e para medidas de geoconservação nas áreas de afloramento destas rochas.

1.6 GEODIVERSIDADE, PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO

A biodiversidade é um conceito bastante difundido na academia e popularizado em meio à sociedade. Ao contrário, a geodiversidade não tem o mesmo destaque e este conceito passa despercebido em diversas ocasiões, no ensino e na pesquisa, na gestão do território, na conservação e preservação da natureza e nas políticas públicas.

Os elementos da geodiversidade são ameaçados, quase sempre de uma forma direta ou indiretamente relacionada com atividades humanas (BRILHA, 2005). No Brasil, ocorrem diversas situações de crimes contra a geodiversidade. Neste sentido, Pontes e Massuqueto (2016) apresentaram exemplos nos Campos Gerais do Paraná e apontam diversas falhas existentes nos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos e ineficiência nas fiscalizações dos órgãos competentes com relação à geodiversidade. Pontes e Massuqueto (2017), além de citar exemplo de ilicitude contra o patrimônio geológico, indicaram que a Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605/1998, não prevê sanções penais para ações cometidas contra a geodiversidade, destacando que esta lacuna prejudica o processo de tipificação, enquadramento e quantificação de crimes contra os elementos abióticos.

Entretanto, foi apenas a partir da década de 90 do século passado que o conceito de geodiversidade passou a ser discutido no meio acadêmico. Para Gray (2004) e Burek e Potter (2002) o conceito ganhou expressão em 1993, na Conferência de Malvern sobre Conservação Geológica e Paisagística. No entanto, Gray (2008) salientou que este conceito adquiriu notoriedade com a Convenção da Biodiversidade, documento originado na II Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como RIO-92. Provavelmente uma das primeiras aplicações do conceito de geodiversidade foi realizada por Sharples (1993) na Tasmânia (Austrália) em estudos de conservação de elementos geológicos e geomorfológicos.

Diversos pesquisadores apresentaram definições sobre o conceito de geodiversidade, dentre eles Sharples (1993), Dixon et al. (1997), Eberhard (1997), Johansson et al. (1999), Stanley (2000), Nieto (2001), Burek e Potter (2002), Sharples (2002), Kozlowski (2004), Gray (2004), Bruschi (2007), Gray (2008), entre outros.

O conceito adotado pela *Royal Society for Nature Conservation* do Reino Unido, segundo Brilha (2005), afirma que a geodiversidade consiste na variedade de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos que dão origem a paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos e outros depósitos superficiais que dão o suporte para a vida na Terra. De maneira simplificada, Nascimento, Mansur e Moreira (2015) apontam que a geodiversidade representa os aspectos inanimados do Planeta

Terra, incluindo os elementos ligados ao passado geológico como também os processos naturais atuais.

Desta forma, apesar dos diferentes conceitos propostos, a geodiversidade pode ser considerada a base de sustentação da biodiversidade. A importância de sua conservação, mesmo se tratando do meio abiótico, é similar ou até mesmo maior que a necessidade de conservação dos elementos com vida, uma vez que todos os seres animados dependem diretamente dos constituintes abióticos para existirem e se desenvolverem.

Enquanto a geodiversidade refere-se a todos os elementos abióticos, incluindo materiais, processos e fenômenos, o patrimônio geológico é apenas uma pequena parcela da geodiversidade, que apresenta características especiais e, por conseguinte, merece/necessita ser conservado (NASCIMENTO, MANSUR e MOREIRA, 2015). Para Pereira (2010) o patrimônio geológico é definido a partir de um levantamento geológico detalhado, seguido da valoração e comparação com dados similares de outros locais.

Brilha (2005) definiu o patrimônio geológico como um conjunto de sítios geológicos, ou geossítios, inventariados e caracterizados em determinada área ou região. Para Nieto (2002) o patrimônio geológico inclui os recursos naturais não renováveis, como formações rochosas, formas de relevo e paisagens, minerais, fósseis e coleções de objetos geológicos, que apresentem algum valor científico, cultural ou recreativo.

Assim, o patrimônio geológico pode ser entendido como o conjunto de geossítios de destaque presentes em uma determinada área, contendo relevante valor para geoconservação em comparação ao restante dos elementos da geodiversidade. Este patrimônio poderá ter importância para a geoconservação em escala local, regional, nacional ou internacional.

Apesar da adoção do conceito de patrimônio geológico, entende-se que e patrimônio geológico e geomorfológico são interconectados e indissociáveis. Portanto, não há incoerência englobar estas duas vertentes das ciências da Terra no conceito de geopatrimônio ou patrimônio natural abiótico. São conceitos que compartilham o mesmo objeto: a geodiversidade.

Assim, as feições cársticas em quartzoarenitos sem cimento carbonáticos podem ser consideradas patrimônio geológico, patrimônio geomorfológico, patrimônio cárstico e patrimônio espeleológico. Análises conceituais como estas,

expressadas anteriormente, merecem discussões aprofundadas, porém isentas de interesses que objetivam unicamente defender determinado ramo das geociências em detrimento de outros. No entanto, na busca de um conceito neutro e holístico, talvez o mais apropriado seja o patrimônio natural abiótico e dentro deste as diversas vertentes (geológico, geormofológico, espeleológico, paleontológico, pedológico, hidrológico etc).

Regiões com ocorrência de carste apresentam diversos processos, formas e feições características e a inventariação destes ambientes, buscando sua geoconservação, exige critérios específicos, que considerem as particularidades presentes deste tipo de relevo. A partir da inventariação é possível identificar, estabelecer a importância e a prioridade para a aplicação de medidas de conservação dos geossítios, que compõem o patrimônio geológico como um todo. É nesta etapa que se busca identificar os valores da geodiversidade, que conforme aponta Gray (2004), incluem os valores intrínseco, cultural, estético, econômico, funcional, científico e didático.

A geoconservação é a busca pela proteção dos elementos abióticos, incluindo os aspectos geológicos e geomorfológicos, processos e produtos associados. Carcavilla, López-Martinez e Durán (2007) salientaram que para a geoconservação é necessário um conjunto de técnicas e medidas para garantir a conservação da geodiversidade.

O conceito de geoconservação, assim como geodiversidade e patrimônio geológico, acaba não ganhando destaque e a importância necessária. Quando o tema conservação da natureza é abordado, a geoconservação raramente é mencionada. Este fato pode ser evidenciado no trabalho de Bittencourt e De Paula (2012) que analisaram a produção científica em unidades de conservação da natureza no Brasil. Os autores constataram a grande quantidade de trabalhos sobre biodiversidade, confirmando a disparidade em relação a artigos sobre geodiversidade. As contribuições de Salvan (1994), Azevedo (2007), Rodrigues e Fonseca (2008), Pereira, Brilha e Martinez (2008), Guimarães, Melo e Mochiutti (2009), Machado e Ruchkys (2010) e Borba (2011) também mostram a falta de atenção com a geodiversidade e, consequentemente, com os aspectos ligados à geoconservação.

Nas políticas públicas este assunto não é diferente, havendo muitas lacunas quando envolve os temas geoconservação, geodiversidade e patrimônio geológico.

Provavelmente, este seja um dos maiores problemas, pois uma das etapas da estratégia de geoconservação é o enquadramento legal (classificação) do geossítio, a partir de quantificação baseada em valores atribuídos à sua geodiversidade.

Neste sentido, são precisos esforços para a promoção e divulgação dos conceitos de geodiversidade, patrimônio geológico e geoconservação no meio acadêmico e na sociedade em geral, e a inclusão destes temas em políticas públicas.

1.7 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização das feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas nas rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha foram realizados pesquisas bibliográficas e levantamentos de campo. Para caracterização geológica foram desenvolvidas explorações e prospecções em cavernas e exposições rochosas superficiais, para elaboração de seções geológicas e caracterização faciológica.

Os estudos visaram feições geológicas específicas, diagnósticas dos processos cársticos e que permitem classificar uma região como cárstica, tais como cavernas, depressões no terreno, espeleotemas, dutos de dissolução, cúpulas, alvéolos (*tafoni*), canais de tetos e de parede (*half-tubes*) e rochas arenizadas e/ou fantomizadas. O objetivo foi discutir a ocorrência, distribuição e gênese destas feições.

As seções geológicas foram realizadas em locais de ocorrência de feições de origem cárstica, onde se buscou avaliar seis parâmetros, sendo: 1) composição mineralógica e parâmetros texturais, tais como granulação e seleção; 2) porosidade; 3) estruturas sedimentares; 4) estruturas tectônicas; 5) feições de intemperismo (rocha arenizada e/ou fantomizada) e; 6) padrão de ocorrência.

Os espeleotemas e amostras de arenito foram analisados em laboratórios com uso de microscopia óptica de luz transmitida, eletrônica de varredura com espectrometria de energia dispersiva, difratometria de raios X e microtomografia computadorizada. Para a realização das análises foram utilizados os laboratórios da Universidade Federal do Paraná (UFPR): de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar (Lab**E**Sed), de Análise de Minerais e Rochas (Lamir) e o Centro de Microscopia Eletrônica (CME/UFPR); da Universidade de São Paulo (USP):

Laboratório de Difração de Raios X (LDRX) e; da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG): Laboratório de Geologia Pesquisa e o Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-labmu).

As análises de espeleotemas com microscopia eletrônica de varredura visaram caracterizar os minerais e identificar possíveis influências de micro-organismos na formação de tais materiais. Esta etapa considerou as similaridades físicas (principalmente forma, cor e composição silicosa) entre os espeleotemas das cavidades subterrâneas de Ponta Grossa, com aqueles existentes em cavernas dos *Tepuis* Venezuelanos, os quais conforme Aubrecht et al. (2008) e Lundberg, Brewer-Carias e McFarlane (2010) são formados a partir da ação de micro-organismos, denominados de microbialitos ou bioespeleotemas.

Seguindo o predisposto na Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente IN/MMA nº 03, de 1 de setembro de 2014 (MMA, 2014) e na Portaria IAP (Instituto Ambiental do Paraná) nº 017, de 19 de janeiro de 2007 (IAP, 2007), para a realização de estudos em cavidades subterrâneas, situadas em unidades de conservação de proteção integral estadual e federal e com coleta de amostras, é obrigatório a licença de pesquisa. As licenças para o desenvolvimento da pesquisa foram obtidas no Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio e Instituto Ambiental do Paraná - IAP (Autorização SISBIO nº 52199-2 e Autorização IAP nº 02/16).

Para as coletas de amostras (rochas arenizadas e/ou fantomizadas, rochas sem alteração e espeleotemas) foram adotados procedimentos técnicos de menor impacto visual/estético aos locais de amostragem, evitando ao máximo danos à geodiversidade e impactos à biodiversidade.

As amostras de rochas arenizadas e/ou fantomizadas foram coletadas com uso de martelo geológico estratigráfico e, antes da retirada dos materiais, foram consideradas, a fim de não impactar a geo e biodiversidade do local, a presença de: a) espeleotemas, b) espeleogens (formações erosivas espeleogenéticas), c) estruturas sedimentares raras, d) locais de coleta próximos ou em pontos de nidificação de espécies da fauna, e) icnofósseis, f) pinturas ou gravuras rupestres, g) outras feições geológicas identificadas.

Para a coleta de espeleotemas utilizou-se canivete, pois estas feições são frágeis, demandando cuidado na retirada dos exemplares, para não danificar as amostras, como também, as feições próximas. Os espeleotemas são feições que

apresentam poucos centímetros de desenvolvimento (máximo 10 cm) e geralmente ocorrem em grupos com vários exemplares. Por este motivo, não foram retiradas amostras de locais aonde a coleta viesse a exaurir tais feições. Para isso, foram escolhidos pontos onde não houve impacto significativo, após análise da quantidade desta feição na caverna para avaliar se a coleta não afetaria de modo irreversível o conjunto de espeleotemas. Os espeleotemas do tipo fibrosos se enquadraram na situação de alta raridade, pois até o momento foi identificado apenas um pequeno conjunto em uma única caverna, fato que possibilitou a coleta de quantidade diminuta de amostra para análise de difratometria de raios X (DRX).

Foram adotados todos os cuidados necessários para reduzir o impacto negativo à integridade da geodiversidade e da biodiversidade das cavidades subterrâneas e afloramentos rochosos presentes no recorte espacial desta pesquisa. Por este motivo, os locais de coleta foram fotografados e indicados nos relatórios finais apresentados aos órgãos ambientais competentes para mostrar o critério adotado durante os levantamentos. Todas as amostras foram registradas por código e depositadas no acervo do Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE).

Este estudo demandou a coleta de oito amostras no Arenito Vila Velha (Formação Campo Mourão), sendo quatro espeleotemas, três rochas arenizadas e/ou fantomizadas e uma rocha não alterada. As coletas foram realizadas em dois locais dentro do Parque Estadual de Vila Velha: Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa e uma fenda ao lado da trilha na porção sul dos arenitos (trilha da mata).

Nos arenitos da Formação Furnas foram coletadas 23 amostras, sendo 18 espeleotemas, um depósito clástico (escorrimento em parede do tipo microterraços), três rochas arenizadas e/ou fantomizadas e uma rocha não alterada. As coletas foram realizadas na furna do Buraco do Padre, Caverna da Chaminé, Gruta da Inspirada, Caverna do Zé, Sumidouro do Córrego das Fendas, Furna do Anfiteatro, Fenda Sem Fim e no paredão de acesso à Gruta Macarrão. Todos os locais de coleta situam-se no Parque Nacional dos Campos Gerais.

Para a identificação dos tipos de usos do solo que proporcionam riscos à conservação do patrimônio geológico foram realizadas pesquisas bibliográficas e levantamentos de campo, bem como análise atualizada do uso do solo no recorte espacial da pesquisa. Além disso, os usos do solo que geram riscos ao patrimônio geológico cárstico que não ocorrem diretamente na área de estudo, mas sim em seu

entorno, foram abordados, a fim de fornecer uma análise ampla dos riscos iminentes à geodiversidade no contexto da região cárstica dos Campos Gerais.

Para discutir políticas públicas e carste em área de substrato constituído por quartzoarenitos sem cimento carbonático, primeiramente foi realizada análise da ocorrência de levantamentos cárstico/espeleológicos em estudos ambientais para licenciamento de empreendimentos com alto potencial degradador. Esta etapa baseou-se em consultas a plataformas *online*, de processos de licenciamento ambiental disponíveis pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) de Ponta Grossa. Foram avaliados Estudos de Impactos Ambientais (EIA), Relatórios Ambientais Simplificados (RAS), Relatórios de Controle Ambiental (RCA), Estudos Prévio de Impactos Ambientais (EPIA) e demais estudos técnicos.

Um levantamento detalhado foi realizado na legislação municipal voltada para o controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico de Ponta Grossa. Para tanto, utilizou-se as plataformas digitais "leismunicipais.com.br" e "smma.pontagrossa.pr.gov.br/licenciamento/" para pesquisas de leis, decretos, resoluções, decretos legislativos e instruções normativas. Palavras-chave foram aplicadas a fim de direcionar a busca ao tema foco, incluindo: *carste, cárstico, cárstica, carstológico, carstologia, pseudocarste, espeleologia, espeleológico, caverna, cavidade subterrânea, lapa, abrigo, gruta, furna, fenda, dolina, abismo, sumidouro, ressurgência, depressão, recalque, geologia, geológico, geodiversidade, geoforma, relevo, geomorfologia, geomorfológico, rocha, rochoso, feição/feições geológica (s), espeleotema, água subterrânea, aquífero, lençol freático, subsolo*. Após identificação dos dispositivos legais encontrados na busca inicial, um filtro foi aplicado, para identificar as leis que efetivamente tratam sobre o objeto desta pesquisa, para enfim efetuar a análise crítica destes instrumentos.

O estudo apresenta produtos cartográficos e para a geração de mapas temáticos (localização da área de investigação, localização das feições geológicas, geologia, região cárstica) foi utilizado ambiente SIG – Sistemas de Informação Geográfica através do programa *QGIS Desktop 2.14.3 with GRASS 7.0.4* (disponível para *download* na *internet*) e *softwares* CAD para desenho de mapas espeleológicos, como o programa livre *OCAD PRO 8*. Os arquivos vetoriais e imagens orbitais aplicados na construção dos mapas foram obtidos gratuitamente através das fontes indicadas a seguir:

a) Limite territorial municipal, estadual e do Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);

b) Imagem SRTM com resolução espacial de 90 metros e curvas de nível de 10 em 10 metros: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA);

c) Imagem Orbital CNES / Airbus (2017): *Google Earth Pro*;

d) Banco de dados das cavidades subterrâneas de Ponta Grossa: Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE);

e) Banco de dados das cavidades subterrâneas do Paraná: Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV); Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) e Agencia de Defesa Agropecuária do Paraná (ADAPAR);

f) Mapa geológico do estado do Paraná e arquivo vetorial – escala 1:250.000 (ano de edição 2005): MINEROPAR Minerais do Paraná S/A (atualmente vinculada ao Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná).

A pesquisa demandou a execução de trabalhos de campo para exploração, descrição e coleta de dados e materiais geológicos (rochas e espeleotemas). Estas atividades foram desenvolvidas com veículos e equipamentos próprios, bem como contou com apoio material, humano e financeiro do Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE).

A pesquisa vinculou-se com o Projeto de Pesquisa A2015_006 (*Valores da geodiversidade de cavidades subterrâneas no contexto da prestação de serviços ecossistêmicos: subsídios para a elaboração do plano de manejo do Parque Nacional dos Campos Gerais, Paraná e propostas para ampliação da unidade de conservação*), executado pelo GUPE, com financiamento da Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza, com duração entre os anos de 2016 e 2017.

Dentre os equipamentos utilizados durante esta pesquisa estão: caderneta de campo quadriculada e escalas granulométricas para apoio na realização de seções geológicas e descrição faciológica e estratigráfica e demais anotações; martelo geológico, talhadeira e canivete para coleta de amostras; câmera fotográfica digital *Canon Rebel T3i*, bússola geológica *Brunton* para medidas topográficas (azimute e rumo de visadas) e geológicas (atitudes de estratos e estruturas tectônicas); Trena *Laser DISTO D810 touch Pack* para mapeamento de cavernas e realização de medidas gerais; GPS *Garmin* para coleta de coordenadas dos pontos

amostrados; *smartphone Samsung On7* com aplicativo *TopoDroid 3.4.3n* (*Cave mapping*) para recepção e tratamento dos dados para mapeamento de cavernas; equipamentos de técnicas verticais em espeleologia para prospecção e; equipamentos básicos de segurança (como perneiras, capacetes, lanternas, macacão etc.).

A estrutura desta tese teve como base as normas técnicas presentes no *Manual de normatização de documentos científicos: de acordo com as normas da ABNT*, da Universidade Federal do Paraná (UFPR, 2017). As normas utilizadas no capítulo 2, resultados e discussões, estão adequadas às normas das revistas científicas em que os artigos foram publicados ou serão submetidos.

1.8 FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES DA TESE

Esta tese está apresentada na forma de artigos científicos, seguindo as normas do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). As referências são apresentadas ao final da introdução e de cada subitem, com o objetivo de facilitar ao leitor a identificação dos trabalhos científicos utilizados em cada momento deste volume. Por este motivo, ao final desta tese, após as conclusões, não serão apresentadas lista de referências. Os resultados e discussões foram separados em quatro momentos, conforme expostos a seguir.

A primeira parte é constituída pelo artigo *Caves geodivesity evaluation as an instrument to the management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil*, que apresenta um inventário e avaliação da geodiversidade de cavidades naturais subterrâneas no Parque Nacional dos Campos Gerais, uma unidade de conservação que inclui parte da área de estudo. Este trabalho visou identificar as feições de origem cárstica e propor um método de valoração do patrimônio cárstico/espeleológico. Os resultados deste artigo forneceram base e direcionaram as análises realizadas nas etapas subsequentes.

O artigo *Espeleotemas em cavernas em quartzoarenitos, município de Ponta Grossa, região dos Campos Gerais, Sul do Brasil* apresenta uma caracterização e discução sobre os aspectos genéticos, forma e composição dos espeleotemas da área de estudo. O estudo aponta que estas geoformas possuem evidências de uma intrínseca relação entre geodiversidade e biodiversidade.

A terceira parte deste capítulo é composta pelo artigo *Caracterização e gênese de feições cársticas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha no município de Ponta Grossa (Paraná, Brasil)*. Neste momento é realizada uma discussão sobre a gênese das feições geológicas de origem cárstica da área estudada mediante análise da relação do seu desenvolvimento com características litofaciológicas. Além dos espeleotemas, foram estudadas as cavernas, depressões no terreno, dutos de dissolução, alvéolos, canais de parede e teto, cúpulas de dissolução e as rochas arenizadas e/ou fantomizadas. Este artigo também caracteriza o modelo carstogenético e processos operantes nas rochas da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha.

A última parte dos resultados desta tese é apresentada no artigo *A região cárstica dos Campos Gerais, Paraná/São Paulo (Brasil): revisão de conceitos, potencial espeleológico e políticas públicas de geoconservação*. Nesta ocasião, foca-se na revisão de conceitos considerados importantes para a gestão de áreas cársticas, apresenta-se uma nova região cárstica não carbonática, calcula-se o seu potencial espeleológico e realiza-se uma análise dos processos de licenciamento na área de estudo e das políticas públicas que tratam do controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico não carbonático. Por fim, discute-se sobre a gestão do território da região cárstica dos Campos Gerais e medidas de geoconservação são propostas.

REFERÊNCIAS

AUBRECHT, R.; BREWER-CARÍAS, CH.; ŠMÍDA, B.; AUDY, M.; KOVÁČIK, L'. 2008. **Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela**. Sedimentary Geology 203. 181–195.

ARAÚJO, T. P. **Sistema fluvial ou dominado por maré?: estudos de processo de sedimentação e arquitetura deposicional no Canyon do Guartelá, Formação Furnas, Devoniano Inferior, Bacia do Paraná, Brasil**. aDissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 2016.

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. J. 1994. **Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 24 (2): 77-89.

ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, São Paulo. 1996.

AZEVEDO, U. R. **Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero,Minas Gerais: potencial para a criação de um Geoparque da UNESCO**. 203 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BARRETO, K. T. **Dinâmica pedogeomorfológica na Formação Furnas - bacia do rio Verde/ Ponta Grossa - PR**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território : Sociedade e Natureza) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, 2016.

BENNETT, P. C. 1991. **Quartz disolution in an organic-rich aqueous system**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 1781-1797

BENITE, A. M. C.; MACHADO, S. P.; MACHADO, B. C. **Sideroforos: "uma Resposta dos Microorganismos"**. Química nova, v. 25, n. 6/B, p. 1155-1164, 2002.

BERGAMASCHI, S. 1992. **Análise Sedimentológica da Formação Furnas na Faixa de Afloramentos do Flanco Norte do Arco Estrutural de Ponta Grossa, Bacia do Paraná**. 172p. (Dissertação de Mestrado. IG-UFRJ, Rio de Janeiro).

BERNER, R. A. (1978). **Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions**. American Journal of Science, 278(9), 1235-1252.

BIGARELLA,J. J.; SALAMUNI, R.; MARQUES FILHO, P. L. 1966. **Estruturas e texturas da Formação Furnas e sua significação paleogeográfica**. Boletim da Universidade Federal Paraná. Geologia, 18, 114p.

BIGARELLA, J. J; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das Paisagens tropicais e subtropicais.** Volume 01. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Ação do intemperismo químico sobre as rochas.** In. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 2° ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. Cap. 3, p. 110 -190.

BITTENCOURT, L. A. F.; DE PAULA, A. **Análise cienciométrica de produção científica em unidades de conservação federais do Brasil**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, n.14; p. 2044-2054. 2012.

BLOOM, A.L. **Intemperismo das rochas**. In. Superfície da Terra. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo – 1970. Cap. 2. p 30-55.

BORBA, A. W. **Geodiversidade e geopatrimônio como bases para estratégias de geoconservação: conceitos, abordagens, métodos de avaliação e aplicabilidade no contexto do Estado do Rio Grande do Sul**. Pesquisas em Geociências, Porto Alegre, v.38, n.1, p. 3-13, 2011.

BREHM, U.; GORBUSHINA, A. A.; MOTTERSHEAD, D. 2005. **The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass**. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 219 (2005) 117–129.

BRILHA, J. 2005. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica**. Lisboa: Palimage. 183p.

BRUSCHI, V. M. 2007. **Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad**. Tesis Doctoral-Universidad de Cantabria. Santander-España. 263 p.

BRUXELLES, L.; QUINIF, Y.; WIÉNIN, M. 2009. **How can ghost rocks help in karst development?** 15th International Congress of Speleology. 2009 ICS Proceedings, p. 814-819.

BÜDEL, B.; WEBER, B.; KÜHL, M.; PFANZ, H.; SÜLTEMEYER, D.; WESSELS, D. (2004). **Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes**. Geobiology, 2(4), 261-268.

BUDNY, J. M. **Imágenes de una cueva en arenisca, Paraná, Brasil: la Cueva Lindolfo**. Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean. 2002. p 1-2. Disponível em: www.fealc.org/boletines/BOL25_febrero2002.doc. Acessado em 12/02/2018.

BUDNY, J. M. **Algunas cuevas en areniscas en Parana, Brasil**. Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean. 2004. p 2-7. Disponível em: http://www.fealc.org/boletines/boletin45.htm. Acessado em 12/02/2018.

BUREK C.; POTTER J. 2002. **Local geodiversity action plans. Setting the context for geological conservation**. Unpublished report for English Nature, Peterborough, UK, 64 p.

CAMA, J.; METZ, V.; GANOR, J. 2002. **The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions.** Geochimica and Cosmochimica Acta 66(22): 3913–3926.

CAMA, J.; GANOR, J. 2006. **The effects of organic acids on the dissolution of silicate minerals: a case study of oxalate catalysis of kaolinite dissolution**. Geochim. Cosmochim. Acta 70, 2191e2209.

CANUTO, J. R.; ROCHA-CAMPOS, A. C.; SATO, P. E. S. 1997. **The Late Paleozoic Lapa Sandstone (Itarare Subgroup): a possible tunnel-valley fill?**. Anais da Academia Brasileira de Ciências,69(2):275-276.

CARCAVILLA URQUI, L.; LÓPEZ-MARTINEZ, J.; DURÁN VALSERO, J.J. 2007. **Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación com los espacios naturales protegidos**. Instituto Geológico e Minero de España, Madri, 360 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **A morfologia cárstica**. In. Geomorfologia. São Paulo, Edgard Blücher, 1º ed, 1974. Cap. 6. p. 120-124.

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

COURREGES-BLANC, M.; MAIRE, R. **Altération de type fantôme de roche dans les calcaires oligocènes du Médoc (France): étude pétrographique et micromorphologique**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 9–16.

DANDURAND, G.; MAIRE, R.; DUBOIS, C.; QUINIF, Y.. **The Charente karst basin of the Touvre: alteration of the Jurassic series and speleogenesis by ghost-rock process**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 27–32.

DECHO, A. 2000. **Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms.** In: Riding, R., Awramik, S.M. (Eds.), Microbial Sediments. Springer, Berlin, pp. 9– 15.

DERRUAU, M.. **Morfologia de las calizas**. In. Geomorfología. Ediciones Ariel – Espana. 1966. Cap. 4 – IV. p. 259-275.

DEWAIDE, L.; BAELE, J-M.; COLLON-DROUAILLET, P.; QUINIF, Y.; ROCHEZ, G.; VAN DYCKE, S.; HALLET, V.. **Karstification in dolomitized Waulsortian mudmounds (Belgium)**. Geologica Belgica (17/1). 2014. p. 43-51.

DIXON, G.; SHARPLES, C.; HOUSHOLD, I.; PEMBERTON, M.; EBERHARD, R. 1997. **Conservation Management Guidelines for Geodiversity**. Unpublished Report to the Tasmanian Regional Forest Agreement Environment and Heritage Technical Committee, April 1997, 70 p.

DOVE, P. M.; RIMSTIDT, J. D. 1994. **Silica-water interaction**. Rev. Miner. 29, 259–308.

DUBOIS, C.; LANS, B.; KAUFMANN, O.; MAIRE, R.; QUINIF, Y.. **Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France)**. Karstologia 57. 2011. p. 19–27.

DUBOIS, C.; QUINIF, Y.; BAELE, J,-M.; BARRIQUAND, L.; BINI, A.; BRUXELLES, L.; DANDURAND, G.; HAVRONI, C.; KAUFMANN, O.; LANS, B.; MAIRE, R.; MARTIN, J.; RODET, J.; ROWBERRY, M.D.; TOGNINI, P.; VERGARI, A.. **The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems.** Earth-Science Reviews 131. 2014, p. 116–148.

EBERHARD, R. 1997. **Pattern and Process: Towards a Regional Aprproach to National Estate Assessment of Geodiversity**. Technical Series nº 2, Australian Heritage commission & Environment Forest Taskforce, Environment Australia-Canberra.

EHRLICH, H. L. 1996. **Geomicrobiology**. 3rd edition. Marcel Dekker, Inc., New York, 719 pp.

FLÜGEL FILHO, J.C. 2012. **Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa (PR): geodiversidade cárstica de um sistema subterrâneo e seus valores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E., 1988. **Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), bacia do Paraná (Parte I)**. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, 2: 147-191.

FRANÇA, A.B.; WINTER, W.R.; ASSINE, M.L. 1996. **Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canallobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências,26(1):43-56.

GALAN, C; LAGARDE, J. **Morphologie et evolution des caverns et forms superficielles dans les quartzites du Roraima (Venezuela).** Karstologia, n. 11-12, 1988. p. 49 – 60.

GANOR, J.; LASAGA, A. C. 2005. **The effects of oxalic acid on kaolinite dissolution rate**. Disponível em: http://www.bgu.ac.il/geol/ganor/papers/G_L_94/G&L94.html. Acessado em: 27/01/2018.

GOLDICH, S. S. 1938. **A study in rock-weathering**. The Journal of Geology 46, 17–58.

GRAY, M. 2004. **Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature**. John Wiley and Sons, Chichester – England.

GRAY, M. 2008. **Geodiversity: the origin and evolution of a paradigm**. In: Burek, C.V. & Prosser, C.D. (eds) The history of Geoconservation. The Geological Society, London, Special Publications, 300, p. 31-36.

GUERRA, A. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

GUIMARÃES, G. B.; MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F.; MELEK, P. R. 2007. **Geologia dos Campos Gerais**. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. 1. ed. Ponta Grossa: UEPG, cap. 2. p. 23- 32.

GUIMARÃES G. B.; MELO, M. S.; MOCHIUTTI N. F. 2009. **Desafios da geoconservação nos Campos Gerais do Paraná**. Geologia USP – Série Publicação Especial, 5: 47-61.

HÄUSELMANN, P.; TOGNINI, P. **Kaltbach Cave (Siebenhengste, Switzerland): phantom of the sandstone?** Acta Carsologica 34/2 5, Ljubljana. 2005. p. 383-396.

HARDT, R. 2003. **Carste em arenitos: considerações gerais**. XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia. Januária MG. Anais. Sociedade Brasileira de Espeleologia. (sem páginas).

HARDT, R.; RODET, J. **O primocarste. um novo paradigma de carstificação e sua importância no carste não carbonático**. Anais do 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia. Rio de Janeiro / RJ. 2012 (sem páginas).

HARDT, R. 2011. **Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias**. Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 224 p.

HÄUSELMANN, P.; TOGNINI, P.. **Kaltbach Cave (Siebenhengste, Switzerland): phantom of the sandstone?** Acta Carsologica 34/2 5, Ljubljana. 2005. p. 383-396

HERSMAN, L., LLOYD, T., & SPOSITO, G. (1995). **Siderophore-promoted dissolution of hematite**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(16), 3327-3330.

HERSMAN, L. E. **The role of siderophores in iron oxide dissolution. In: Environmental microbe-metal interactions**. American Society of Microbiology, 2000. p. 145-157.

HIJAZIN, C. A. H.; SIMÕES, A. T.; SILVEIRA, D. R. **Hidrólise ácida, alcalina e enzimática**. Revista Atitude - Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre. Ano IV. Número 7. 2010. p. 89-93.

IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. 2007. **Portaria IAP (Instituto Ambiental do Paraná) nº 017, de 19 de janeiro de 2007**. Disponível em: http://celepar7.pr.gov.br/sia/atosnormativos/form_cons_ato1.asp?Codigo=1908. Acessado em: 18 de janeiro de 2018.

ILER, R. K. 1979. **The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry**. John Wiley and Sons, New York, 1979. 866 p.

JENNINGS, J. N.. **Sandstone pseudokarst or karst? In: Young, R. W.; Nanson,G. C. Aspects of Australian Sandstone Landscapes.** Wollongong: Australian ans New Zealand Geomorphology Group Special Publication no.1. 1983.

JOHANSSON, C. E., ANDERSEN, S. E ALAPASSI, M. 1999. **Geodiversity in the Nordic Countries**. ProGEO News, 1, 1- 3.

KARMANN, I. **Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica**. In TEIXEIRA, W; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F.. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 114-136.

KAUFMANN O., BINI A., TOGNINI P. et QUINIF Y. 1999. **Étude microscopique d'une altérite de type fantôme de roche.** Études de géographie physique. Travaux 1999 – Suppl. XXVIII, Cagep, Université de Provence 129-134.

KAUFMANN, O.; DECEUSTER, J.. **Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods — an overview**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 17–26.

KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C. **Types of karst and evolution of hydrogeologic Settings.** In: KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.) Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: National Speleological Society, 2000.

KOZLOWSKI S. 2004. **Geodiversity. The concept and scope of geodiversity**. Przeglad Geologiczny, vol. 52, no. 8/2, p. 833-837.

KRAEMER, S. M. **Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores**. Aquatic sciences, v. 66, n. 1, p. 3-18, 2004.

LAVERTY, M. **Preparing the ground – new mechanisms for karst and speleogenesis: 'altération', fantomisation and replacement**. Transactions of the British Cave Research Association. CAVE AND KARST SCIENCE, Vol.39, No.2, 2012. p. 72-76.

LEE, S. O.; et al. **Dissolution of iron oxide using oxalic acid**. Hydrometallurgy, v. 87, n. 3-4, p. 91-99, 2007.

LESTENSKI, R.; MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; PIEKARZ, G.F. 2011. **Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução**. In: CARPANEZZI, O.T.B.; CAMPOS, J.B., organizadores. Coletânea de pesquisas: Parque Estaduais de Vila Velha, Cerrado e Guartelá. p. 239-248.

LOBATO, G.; BORGHI, L. 2005. **Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em afloramentos da borda leste da Bacia do Paraná**. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, Salvador. Anais. Salvador: IBP, p.1-6.

LUNDBERG, J., BREWER-CARIAS, C., & MCFARLANE, D. 2010. **Preliminary results from U–Th dating of glacial–interglacial deposition cycles in a silica speleothem from Venezuela.** Quaternary Research, 74(1), 113-120. doi:10.1016/j.yqres.2010.03.005

MAACK, R. 1946a. **Geologia e geografia da região de Vila Velha e considerações sobre a glaciação carbonífera do Brasil**. Curitiba, Arquivos do Museu Paranaense, v.5, 305p.

MAACK, R. 1946b. **Notas preliminares sobre uma nova estratigrafia do Devoniano do Estado do Paraná**. In: Congresso Pan-Americano de Engenharia de Minas e Geologia, 2, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, v.4.

MAACK, R. 1956. **Fenômenos carstiformes de natureza climática e estrutural de arenitos do Estado do Paraná**. Arquivos de Biologia e Tecnologia 11: 151–162.

MACHADO, M. M. M.; RUCHKYS, Ú. A. **Valorizar e divulgar a geodiversidade: estratégias do Centro de Referência em Patrimônio Geológico (CRPG) MHNJB-UFMG**. Geonomos , v. 2, p. 53-56, 2010.

MAINGUET, M. **Le modelé des grès: Problèmes Généraux**. Paris: Institut Géographique National. 1972. 228 p.

MARESCAUX, M. G. **Les Grottes du Gabon nord-oriental : un Karst dans l'oxyde de fer et la silice.** Bulletin de l'Association de Géographes Français. Paris: 410, Juillet Octobre. 1973. p. 606-618.

MARTINI, J. E. J. **Karst in black reef quartzite near kaapsehoop, eastern transvaal**. Ann. South Afr. Geol. Surv. 13. 1979. p. 115-128.

MARTINS, J. C.; MARTINS, E. de S.; REATTO, A. **Revisão de intemperismo de micas**. Embrapa Cerrados. Documentos, 2004. 48 p.

MASSUQUETO, L.L. 2010. **O sistema cárstico do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa - PR): caracterização da geodiversidade e de seus valores**. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

MAURICE, P. A.; VIERKORN, M. A.; HERSMAN, L. E.; FULGHUM, J. E.; FERRYMAN, A. 2001. **Enhancement of kaolinite dissolution by an aerobic Pseudomonas mendocina bacterium**. Geomicrobiology Journal 18(1): 21–35.

MELO, M. S.; COIMBRA, A. M. 1996. **Ruiniform relief in sandstones – the example of Vila Velha, Carboniferous of the Paraná Basin, Southern Brazil**. Barcelona, Acta Geológica Hispanica,31(4): 25-40.

MELO, M.S.. 2006. **Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 145p.

MELO, M. S.; BOSETTI, E. P.; GODOY, L. C.; PILATTI, F. 2007. **Vila Velha, PR: Impressionante relevo ruiniforme.** In.: SCHOBBENHAUS, C. /CAMPOS, D.A. / QUEIROZ, E.T. / WINGE, M. / BERBERT-BORN, M.. Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. p. 269-277.

MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F. 2007. **Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 32, p. 2149- 2164.

MELO, M. S. **Aquífero Furnas - urgência na proteção de mananciais subterrâneos em Ponta Grossa, PR**. In.: Anais do Seminário Internacional "Experiências de Agenda 21: Os desafios do nosso tempo". Ponta Grossa – PR – Brasil. 27 a 29 de Novembro de 2009. (sem paginas)

MELO, M.S. 2010. **Processos erosivos superficiais e subterrâneos em arenitos da Formação Furnas na região dos Campos Gerais do Paraná**. Relatório Resumido. CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 20p.

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

MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; CHINELATTO, A.L.; GIANNINI, P.C.; PONTES, H.S.; CHINELATTO, A.C.A.; ATENCIO, D. 2015. **Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences 63 (2015) 20-35.

METZ, V.; GANOR, J. 2001. **Stirring effect on kaolinite dissolution rate**. Geochimica and Cosmochimica Acta 65(20): 3475–3490.

MILANI, É. J., FRANÇA A. B., SCHNEIDER R. L.. 1994. **Bacia do Paraná**. Bol. Geoc. PETROBRÁS, 8:69-82.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES; L. A. E FRANÇA, A. B. (2007) **Bacia do Paraná**. IN: Cartas Estratigráficas - Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.

MINEROPAR. 2007. **Relatório final: mapeamento geológico da folha de Ponta Grossa (1:100.000)**. 245p. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/mapeamento/Relatorio_Folha_Ponta_Grossa_2007.pdf. Acessado em: 30 de agosto de 2019.

MIOT, J.; BENZERARA, K.; KAPPLER, A.. 2014. **Investigating Microbe-Mineral interactions: Recent Advances in X-Ray and Electron Microscopy and Redox-Sensitive Methods**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2014. 42: 271–89

MMA – Ministério do Meio Ambiente. 2014. **Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente IN/MMA nº 03, de 01 de setembro de 2014**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/sisbio/images/stories/instrucoes_normativas/INSTRU%C3%87%C3%83O_NORMATIVA_ICMBio_N%C2%BA_3_DE_2014__com_retifica%C3%A7%C3%A3o_do_DOU18062015.pdf. Acessado em: 18 de janeiro de 2018.

MOREIRA, J. C. (2012) **Interpretative Panels About the Geological Heritage – a Case Study at the Iguassu Falls National Park (Brazil)**. Geoheritage 4: 127-137. doi: 10.1007/s12371-012-0053-5

NASCIMENTO, A. L. do N.; MANSUR, K. L; MOREIRA, J. C**. Bases conceituais para entender geodiversidade, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo**. 2015. Disponível em < www.ojs.ufpi.br/index.php/equador/article/download/3643/2119> Acesso em 18 de janeiro de 2018.

NIETO, L. M. 2001. **Geodiversidad: propuesta de una definición integradora**. Boletín Geológico y Minero- España, Vol. 112, No 2, p. 3-12.

NIETO, L. M. 2002. **Patrimonio Geológico, Cultura y Turismo**. Boletín del Instituto de Estudios Giennenses, No 182, p. 109-122.

OLIVEIRA, E. P. (1912) **O terreno devoniano do sul do Brasil**. IN: Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, vol. 14, pp. 31-41.

OLIVEIRA-GALVÃO, A. L. C.; JANSEN, D. C.; LIMA, M. F. 2009. **Regiões cársticas do Brasil**. CECAV/Instituto Chico Mendes. Brasília. Disponível em http://www4.icmbio.gov.br/cecav/index.php?id_menu=362. Acessado em 17 de janeiro de 2018.

PANIAS, D.; TAXIARCHOU, M.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A. **Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions**. Hydrometallurgy, v. 42, n. 2, p. 257-265, 1996.

PAVAN, B. H. **Sistemas fluviais de grandes dimensões: uma reinterpretação da Formação Furnas no Cânion Guartelá-PR**. Trabalho de conclusão de curso de Geologia na Universidade Estadual de Campinas. 2015. 45p.

PEREIRA, R. F.; BRILHA, J.; MARTINEZ, J. E. (2008) **Proposta de enquadramento da geoconservação na legislação ambiental brasileira.** In: Memórias e Notícias da Conferência Internacional: As Geociências no Desenvolvimento das Comunidades Lusófanas. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Minerol. Geol., Univ. Coimbra. 3: 491-494

PEREIRA, R .G. F. A. **Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia-Brasil).** 2010, 317 f. Tese de Doutorado em Ciências – Especialidade em Geologia. Universidade do Minho Portugal. 2010.

PETRI, S. 1948. **Contribuição ao Estudo do Devoniano Paranaense**. Rio de Janeiro. Boletim 129, DNPM/DGM. 125p.

PONTES, H. S. 2010. **Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, Paraná. Exemplo de Relevo Cárstico na Formação Furnas**. Monografia (Graduação em Bacharelado em Geografia) – Setor de Ciências Exatas e Naturais. UEPG.

PONTES, H.S. 2014. **Espacialização de feições cársticas da Formação Furnas: ferramenta para gestão do território no Município de Ponta Grossa (PR)**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 163p.

PONTES, H.S.; MASSUQUETO, L.L. **Riscos eminentes ao patrimônio cárstico não carbonático dos Campos Gerais do Paraná: conflitos na conceituação, lacunas na legislação ou negligência?** Anais do XI Simpósio Nacional de Geomorfologia – SINAGEO. Maringá. 2016. Disponível em: http://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/9/9-499-133.html. Acessado em 12/02/2018.

PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L. **Geodiversidade e políticas públicas: um estudo de casos nos Campos Gerais do Paraná**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO, 4., ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO, 2., 2017, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: GUPE, 2017. p. 254-258.

PRESS, F; SIEVER R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Intemperimo e erosão**. In: Para Entender a Terra. Tradução Rualdo Menegat, 4 ed. – Porto Alegre: bookman, 2006. p. 170-192.

QUINIF, Y. **Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification.** Etudes de géographie physique, Travaux - Supplement 18. University of Provence. 1999. p. 159–164.

QUINIF, Y.; BRUXELLES. L.. **L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification 'Ghost rock' weathering: processes, evolution and implications for the karstification**. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2011, n° 4, p.?.

QUINIF, Y.; BAELE, J., M.; DUBOIS, C.; HAVRON, C.; KAUFMANN, O.; VERGARI, A.. **Fantômisation: un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistasie d'Erhard.** Geol. Belg. 17. 2014. p. 66–74.

RENAULT, P. 1953. **Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional.** Anais I Congrès International de Spéléologie. p. 275-289.

RODET, J. **Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies: le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansionnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France)**. C. R. Acad. Sci. III 322. 1996. 1039–1045.

RODET, J.. **The primokarst, former stages of karstification, or how solution caves are born**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 58–65.

RODET J. 2017. **The cave: a result of a long evolution named karstification - a conceptual approach**. In. 26th International Karstological School, Postojna, abstract: 48-49.

RODRIGUES, M. L.; FONSECA, A. **A valorização do geopatrimónio no desenvolvimento sustentável de áreas rurais**. Comunicação apresentada no VII CIER – Cultura, Inovação e Território. Lisboa – Portugal. 2008. Sem páginas.

ROMANÍ, J. R. D.; RODRIGUEZ, M. V. **Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution**. Nature Conservation 63: 41-46. 2007.

ROSA, D. R. **As Jazidas de Opalas Nobres da Região de Pedro II no Estado do Piauí**. Jundiaí, Paco Editorial: 2014. 224 p.

ROWBERRY, M.D.; BATTIAU-QUENEY, Y.; WALSH, P.; BŁAŻEJOWSKI, B.; BOUT-ROUMAZEILLES, V.; TRENTESAUX, A.; KŘÍŽOVÁ, L.; GRIFFITHS, H.. **The weathered Carboniferous limestone at Bullslaughter Bay, South Wales: the first example of ghost-rock recorded in the British Isles**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 33–42.

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

SAURO, F. **Speleogenesis and secondary cave minerals in quartz-sandstone and quartzite environment**. Tese de Doutorado. Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. 2014. 254p.

SALVAN, H. M. **Un problême d'actualité: la sauvegarde du patrimoine géologique. Quelquesréflexions**. Symposiu, International Sur La Protection du Patrimoine Geologique, Digne Les Bains, 1994. Mémoire, n.s, n.165, p. 229-230.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 28. Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, SBG, v.I, p. 41-65.

SCHWERTMANN, U. **Solubility and dissolution of iron oxides**. Plant and soil, v. 130, n. 1-2, p. 1-25, 1991.

SHADE, B. L.. **The Genesis and Hydrogeology of a Sandstone Karst in Pine County, Minnesota** [master's thesis]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 2002. 171 p.

SHARPLES, C.. 1993. A **Methodology for the Identification of Significant Landforms and Geological Sites for Geoconservation Purposes**; Report to Forestry Commission, Tasmania.

SHARPLES, C. 2002. **Concepts and principles of geoconservation**. Published electronically on the Tasmanian Parks & Wildlife Service website. Disponível em: http://dpipwe.tas.gov.au/Documents/geoconservation.pdf. Acessado em 18 de janeiro de 2018.

SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R. B. **Caracterização das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na região sul do estado de Mato Grosso**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 33, n. 2, p.261-277, 2014 .

SOARES, O. 1988. **Furnas dos Campos Gerais (Paraná): depressões pseudocársticas.** Anais do 1°Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, Instituto de Educação de Minas Gerais - Belo Horizonte. p. 40-54.

SOARES, O. 1989. **Furnas dos Campos Gerais, Paraná.** Curitiba: Scientia et Labor - XVII, 82 p.

SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P. 2000. **O ecarpamento estrutural Furnas na região S-SE do Brasil**. In: Schobbenhaus,C.; Campos,D.A.; Queiroz,E.T.; Winge,M.; Berbert-Born,M. (Edit.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Disponível em: http://www.unb.br/ig/sigep/sitio080/sitio080.htm. Acessado em: 29/01/2018.

SPONHOLZ, B.. **Phénomènes karstiques dans les roches siliceuses au Niger Oriental**. Karstologia N° 23, 1/1994: 23-32.

STANLEY, M. **Geodiversity**. Earth Heritage, Londres, v.14: p. 15-18, 2000.

SCHOTT, J.; OELKERS, E. H. 1995. **Dissolution and crystallization rates of silicate minerals as a function of chemical affinity**. Pure and Applied Chemistry 67(6): 903–910.

STRIEBEL, T., SCHÄFERJOHANN, V.. **Karstification of sandstone in Central Europe: attempts to validate chemical solution by analyses of water and precipitates**. In: Proc. 12th Intern. Congress of Speleology, 1997, Switzerland, Vol. 1, 473 – 476.

SUTHEIME, S. H.; MAURICE, P. A.; ZHOU, Q. 1999. **Dissolution of well and poorly crystallized kaolinites: Al speciation and effects of surface characteristics**. American Mineralogist 84: 620–628.

TAXIARCHOU, M.; PANIAS, D.; DOUNI, I.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A. **Dissolution of hematite in acidic oxalate solutions**. Hydrometallurgy, v. 44, n. 3, p. 287-299, 1997.

TOLEDO, M. C. M; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. 2000. **Intemperismo e formação de solos**. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. ed. Decifrando a Terra (capítulo 8). São Paulo, Oficina de Textos. p.139-166.

UFPR – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Manual de normalização de documentos científicos de acordo com as normas da ABNT**. Org. Maria Simone Utida dos Santos Amadeu et. al.. Curitiba: Ed. UFPR, 2017. 327 p.

URBANI, F. **Algunos comentários sobre terminologia karstica aplicada a rocas siliceas.** Bol. Soc. Venezolana Espel. (24). 1990. p. 5 – 6.

VASCONCELOS, A. M. C. 2014. **O criptocarste como interface entre o solo e o substrato rochoso: comparação entre os ambientes siliciclástico e o carbonático na região entre Rodeador e Diamantina-MG**. Tese de doutorado Universidade Federal de Minas Gerais. 150p.

VERGARI, A., QUINIF, Y. **Les paléokarsts du Hainaut**. Geodin. Acta 10, 1997. p. 175–187.

VESELY F. F., TRZASKOS-LIPSKI B., KRAFT R. P., ROSTIROLLA S. P., APPI C. J. 2003. **Facies architecture of a Permocarboniferous sandstone reservoir analogue, Itararé Group, Paraná Basin, Brazil**. In: Latin American Congress of Sedimentology, 3, Anais...

VESELY F. F.; ASSINE M. L. 2004. **Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 34:219-230.

VESELY, F. F. 2011. **Sulcos de origem glacial em arenitos neocarboníferos do Parque Estadual de Vila Velha, sudeste do Paraná**. Geociências (São Paulo. Impresso), v. 30, p. 589-599.

WERNICK, E.; PASTORE, E. R. B.; PIRES NETO, A. **Cavernas em Arenitos**. Notícias Geomorfológica, 13. (26): 55 – 67, 1976.

WHITE, W. R.; JEFFERSON, G. L.; HAMAN, J. F. **Quartzite karst in southeastern Venezuela.** Speleology II. 1966. p. 309 – 314.

WILLEMS, L. **Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, dês gneiss et des granites em Afrique sahélienne et équatoriale.** Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique. 2000. 257 p.

WILLEMS L.; RODET J.; POUCLET A.; MELO S.; RODET M. J.; COMPÉRE P. H.; HATERT F.; AULER A. A. **Karst in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil.** Cadernos Lab. Xeólóxico de Laxe. Belgium: Corunã. 33. p.127-138. 2008.

WRAY, R.A.L., 1997. **A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones**. Earth Sci. Rev. 42, 137-160.

WRAY, R. A. L. **Quartzite dissolution: karst or pseudokarst?** Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, p. 1- 9, abr. 2003.

WRAY, R. A. L.. **Phreatic drainage conduits within quartz sandstone: Evidence from the Jurassic Precipice Sandstone, Carnarvon Range, Queensland, Australia**. Geomorphology 110. 2009. p. 203–211.

WRAY, R. A. L.; SAURO, F. **An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites**, Earth-Science Reviews (2017), doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.008

YOUNG, R.. **Tower karst in sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia.** Z. Geomorph. N.F. 30(2): 1986. 189-202.

YOUNG, R. W. **Quartz etching and sandstone karst: Examples from the East Kimberleys, northwestern Australia**. Zeitschrift fur Geomorphologie 32: 1988. 409-423.

ZALÁN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C. D. J., VIEIRA, I. S., & ASTOLFI, M. A. M. (1987). **A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 17, 243.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. 1990. **Bacia do Paraná**. In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. Origem e evolução de Bacias Sedimentares. 2. ed. Rio de Janeiro: Gávea. Cap. Bacia do Paraná. p. 135- 168.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.1 CAVES GEODIVERSITY EVALUATION AS AN INSTRUMENT TO THE MANAGEMENT OF THE CAMPOS GERAIS NATIONAL PARK, SOUTHERN BRAZIL[1]

Henrique Simão Pontes, Laís Luana Massuqueto, Luiz Alberto Fernandes, Antonio Carlos Foltran, Mário Sérgio de Melo, Jasmine Cardozo Moreira

Abstract

This paper aims to evaluate the geodiversity of sandstone caves in the Campos Gerais National Park, Southern Brazil. The subject of the research was the inventory, quantification and classification (ranking) of geodiversity features and biological elements, in order to identify which caves are fragile, vulnerable and demand prioritary management action. The inventory proposes a data plan template with eleven characteristics for evaluation of 33 caves and generated a set of speleological information for the Campos Gerais National Park. The quantification and classification of the caves were based on five factors: a) underground geodiversity features; b) vulnerability; c) expropriation priority; d) sensibility and e) potential to scientific use. A case study shows topics that may influence the relevance of the sandstone caves, such as: a) karstification process in non-carbonate siliciclastic rocks; b) geological function of the caves; c) interactions between geodiversity and biodiversity and d) recent changes in Brazilian laws about cave protection and speleological relevance. The results showed that cave geodiversity evaluation through inventory, quantification and classification (ranking) is an effective instrument to identify which caves must be prioritized in conservation actions. The evaluation can directly contribute to the management plan and other conservation actions in the Campos Gerais National Park. It can be applied in other areas for the analysis of eventual enlargement or creation of new protected areas.

Key-words: caves; geodiversity inventory; protected areas; geoconservation strategies.

---

[1] Artigo publicado no ano de 2018 na Revista Geoheritage – disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-018-0317-9

Introduction

The identification of priority areas for conservation in Brazil is mainly based on biological aspects of the landscape, such as the presence of fauna, forests, natural fields and other flora elements. The main Brazilian legislation about protected areas is the Law n° 9.985, July 18th, 2000, has created the Sistema Nacional de Unidades de Conservação (National System of Protected Areas) (Brasil 2000). This law rarely approaches anything about geological heritage, and themes like geodiversity and geoconservation are not mentioned.

This reflects the low visibility and importance that the geodiversity elements receive in Brazilian protected areas, as reported by Pereira, Brilha and Martinez (2008). Even in national parks, where the mainly natural attractive are landscapes that present relevant geological and geomorphological aspects, the geodiversity does not have the necessary highlight. As example of this case, the Iguassu Falls National Park (UNESCO World Heritage), situated on the border between Brazil and Argentina, there is a monumental waterfall ensemble formed on Mesozoic basaltic spills, however, there is few information about it in interpretative panels, folders and other promotion materials of the protected areas, as indicated by Moreira (2012).

The lack of attention involving not promoting information about geological and geomorphological phenomena, geodiversity features and the evolutionary processes that have transformed the landscape, are recurrent in many protected areas all around the Brazilian territory.

However, virtually many UCs present landscapes with unique geodiversity features. This remarkable presence should not be ignored and such as the biodiversity aspects, geodiversity features need studies, divulgation and conservation aiming the management. The geodiversity should be widely discussed in studies for the identification of priority areas for conservation, as also in researches focused in environmental control and monitoring the protected areas that already exist.

In this sense, the geoconservation have practices that can contribute directly to the management of the Brazilian protected areas. Geoconservation strategies, according to Brilha (2005; 2016) include inventory, quantification, classification, conservation, evaluation and divulgation and geodiversity monitoring is an important instrument of management to the protected areas.

Caves constitute environments of meaningful geodiversity and biodiversity (Culver and Sket 2000; Ford 2006; Palmer 2007; Melo et al. 2011; Souza-Silva, Galão and Bichuette 2015; Martins and Ferreira 2015). Caves geological features are evidence of genetic and evolution processes, unique interactions between biotics and abiotics elements, besides being intrinsically correlated with superficial and underground water action, as large aquifers recharging zones.

In spite of that, studies about geodiversity still are insufficient, mainly in caves formed by siliciclastic sandstone, for example, the Campos Gerais National Park (PNCG) caves, located in Southern Brazil. Recent research has given attention to this type of caves and its geological features (Melo and Giannini 2007; Pontes et al. 2010; Melo 2009; Massuqueto, Guimarães and Pontes 2010; Melo et al. 2011; Pontes and Melo 2011; Melo et al. 2015; Pontes 2016; GUPE 2017). These studies show geodiversity features developed by quartz dissolution process in ambient temperature, microbial action record in the siliceous speleothems formation and quartz sandstone dissolution, as indicate by Pontes (2017), interactions between biodiversity and geodiversity and geosystemic functions of the caves as aquifer recharge.

The recent decree-law n° 6.640/2008 (Brasil 2008) provides that every cave in the Brazilian territory must undergo a process of determining the speleological relevance, which will define the possibility of its total suppression or not. This decree-law presented a method that classifies the caves in maximum, high, medium and low relevance, and has received heavy criticism from the academic community (Marra 2008, Figueiredo et al., 2010, Trajano and Bichuette 2010, Berbert-Born 2010). Previously there was a "broad protection" of the caves (although sometimes it did not happen), but the demand for natural resources resulted in exploration of areas with caves and their destruction, if necessary. For this reason, legislation has been amended.

The great challenge of a law like Decree-Law n° 6.640/2008 (Brasil 2008) is to define how to evaluate, which method, parameters and elements should be evaluated without prejudicing the object under analysis. For this reason, it is important to have proposals that aim to answer these questions, search for references of parameters, values and numbers that better represent natural singularities, interactions and dynamics.

Attributing numerical values to the geodiversity elements will always be subjective, there is always a risk of assigning high or very low values to a parameter, altering the final result. However, the quantification is necessary, once there are legal provisions in Brazil, which require the geological heritage quantification, based on the attribution of numerical values.

Thus, the sandstone caves geodiversity of PNCG constitutes an important parameter to be evaluated in geoconservation strategies. Therewith, this paper presents a method to evaluate the caves geodiversity of this protected area. The research involved inventory, quantification and classification (ranking) of the geodiversity features and biological elements, in order to identify which caves are fragile, vulnerable and priority to the management actions. In the same way, this method can be applied in analysis to aim determination of speleological relevance, according to the Brazilian laws.

Study area

The Campos Gerais National Park is a protected area classified as an integral protection, located in the municipalities of Ponta Grossa, Castro and Carambeí, State of Paraná, Southern Brazil (Fig. 2.1). Created in 2006, with 218.26 km² this protected area aims to protect the last remaining of natural fields and forests with Araucaria pine, beyond of archaeological heritage and singular geological and geomorphological formations. Currently, the Campos Gerais National Park is initiating the expropriation process, which requires studies indicating priority areas for conservation.

Among these geological and geomorphological features, the caves are amongst the highlights. These cavities can be of several types, as caves, grottos, rock shelters, abysms and doline (sinkhole) and they vary from few meters to more than one kilometer of linear extension. The largest cave in the park is the Sumidouro do Córrego das Fendas (Flügel Filho, Guimarães and Pontes 2011; Flügel Filho 2012; GUPE 2017). This underground system has 1300 meters of extension mapped and it is the fourth longest Brazilian cave developed in sandstone. According to GUPE (2017) there are new galleries known in this system, nevertheless, they are not yet accounted in the total length.

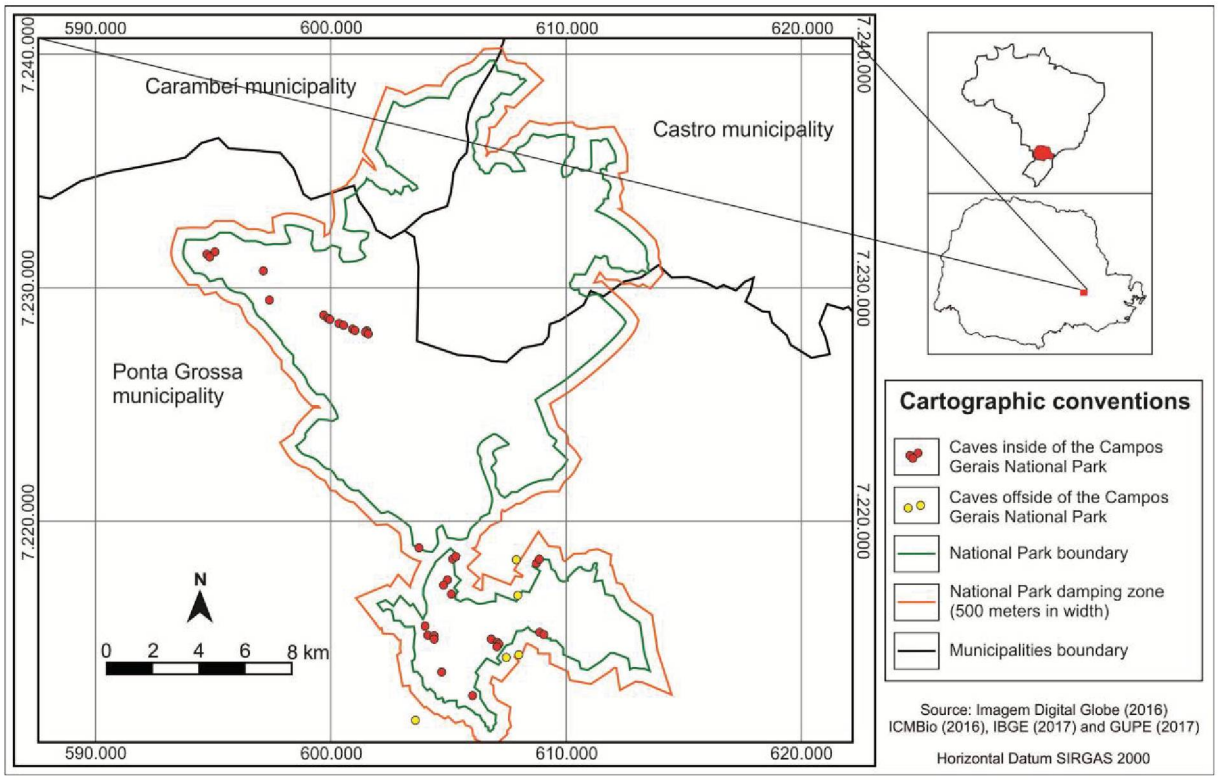


Fig. 2.1 Location of the Campos Gerais National Park and distribution of the caves.

In the total, 38 caves are under jurisprudence of Campos Gerais National Park, 35 situated inside the UC and three in the damping zone (Fig. 2.2). There are two more cavities near to damping zone limit included in the evaluation due to geological singularities present in these environments. Thus, besides providing methodological subsidies to the management actions inside of UC, this study enables the identification of priority areas to conservation in places near the park.

All PNCG caves are formed in sandstones of the Furnas Formation. These rocks appearing on the east edge of the Paraná Sedimentary Basin, with age between 395-421 My (Silurian/Devonian) (Borghi 1993; Assine 1999; Milani et al. 2007). According to Assine (1996), Melo and Giannini (2007) and Milani et al. (2007) this formation is predominantly compounded by quartz sandstones of medium to coarse gran-size, cemented by kaolinite and illite, showing different stratifications and presenting layers of silty and clay of thickness usually decametric.

The PNCG landform and hydrography as well as the caves and other geological features are controlled by remarkable tectonic structures related to Ponta Grossa Arc. This rupture structure reflects a huge regional crustal arching and according to Zalán et al. (1990) was active since the Paleozoic, but with apex during

the Mesozoic. This is the record of a trend of continental break in the interior of the state of Paraná during the separation between South American and African plates.

Fig. 2.2 Campos Gerais National Park caves. a) Sumidouro do Rio Quebra-Perna cave; b) Andorinhas cave; c) Sumidouro do Córrego das Fendas cave; d) Zé cave. These caves had the best classification in the geodiversity evaluation.

Methods

In order to identify which PNCG caves are priorities for management actions, the research was developed in four stages: 1) fieldwork to explore, identification and data collect; 2) the application of geodiversity inventory in all caves; 3) systematization of data and the formatting of a complete inventory of the cavities and 4) quantification and classification (ranking) based on the inventory to define underground geodiversity features, vulnerability, expropriation priority, sensibility and potential of scientific use to each cave.

There are several proposals for geodiversity inventory and quantification, applied in areas ranging from small localities to large territorial extensions, such as

regions and countries (Brilha 2005, 2016; Cendrero 1996, 2000; Pereira 2006; Lima 2008; Trueba 2008; Pereira 2010). This work is pioneering to carry out an inventory for the geodiversity quantification specifically of subterranean environments. To understand the fragility and vulnerability of the underground geodiversity, the analysis at smaller scales is more adequate, being possible to identify specific characteristics of these environments. Therefore, this research was conducted from surveys in caves, constituting small areas of analysis.

The inventor form of the caves geodiversity applied in the PNCG was elaborated based on proposition of Dias (2003) and Gray (2004). The first author showed a field form designed to standardize data from caves collected in the field for the registration purpose. The second one proposes the inclusion of functional value for geodiversity, including utility, geosystemic and ecosystem functions, among others. The final inventory form was adapted for application in the study area considering the physical and biological characteristics of the local caves.

The inventory was divided into two parts, one for filling in during fieldwork and another to be filled in the office. The first part involved an analysis of the caves characteristics and its surroundings, during the fieldwork. The second one, which aims the urgency to protection and the identification of the cave functional value, according to Gray (2004), was developed with a technical team of researchers from the Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas – GUPE (University Group of Speleological Research). These meetings enabled a multidisciplinary discussion and an integrated analysis of data obtained during the fieldwork.

The inventory form presented eleven topics, which are: a) general information, b) aspects of the access until the cave, c) speleometric data, d) hydrographic data, e) geological data (including the caves geodiversity features), f) biospeleological data (observation only, without specimen collection), g) immediate surroundings characterization, h) potential of scientific use of the caves, i) general observations, j) urgency to protection of the caves and k) functional value.

With the inventory of the geodiversity it was possible to quantify and classify (establish a ranking) the PNCG caves and its immediate surroundings. This step served to indicate which caves are priorities for protective actions, identify areas for expansion of the protected area and define which places are urgent for expropriation.

To quantify and classify the caves, five items of the inventory form filled were evaluated, which are: a) underground geodiversity features, b) vulnerability, c)

expropriation priority, d) sensibility and e) potential to scientific use. The classification (ranking) is obtained from the sum of the values assigned for each item evaluated in the inventory, as exemplified in table 2.1.

Table 2.1: The quantitative method used to evaluate the cave geodiversity.

Evaluated items	Value attributed	Maximum value added	Inventory topics used in integrated analysis
Underground geodiversity features	0.5 point for each feature identified	7.0 points	Geological data
Vulnerability	Very high level = 4.0 High level = 2.0 Intermediary level = 1.0 Low level = 0.5 Very low level = 0.25	4.0 points	Hydrographic, geological and biospeleological data, immediate surroundings characterization and functional value
Expropriation priority	Very high level = 4.0 High level = 2.0 Intermediary level = 1.0 Low level = 0.5 Very low level = 0.25	4.0 points	Speleometric, hydrographic, geological and biospeleological data, immediate surroundings characterization, potential of scientific use, urgency to protection of the caves and functional value
Sensibility	Yes = 4.0 Not = 0.0	4.0 points	Aspects of the access until the cave, hydrographic, geological and biospeleological data and immediate surroundings characterization
Potential to scientific use	0.5 points for each feature identified	4.0 points	Speleometric, hydrographic, geological and biospeleological data

The use of 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 e 4.0 is a criterion adopted for the method presented in this paper, however, as presented by Brilha (2016), the application of weights in the quantification process demands more discussions. The maximum value in the evaluation of each item is 4.0 points, only the underground geodiversity features the total score can reach 7.0 points. This difference is intentional, because the exposed method seeks to value the presence of this item in the caves.

The existence of fourteen underground geodiversity features were evaluated, like as: a) ghost-rock, b) speleothems, c) dissolution conduit, d) dissolution dome, e) balance chimney, f) alveoli (honeycomb), g) ceiling half-tube, h) plunging-pool (Fig. 2.3), i) anastomosis, j) incrustation, k) scallops, l) clastic deposits, m) ichnofossil and n) vertical grooves in thin granulation layers (whale's tooth) (Fig. 2.4). For each features of cave geodiversity that were presented it was added the value of 0.5 point.

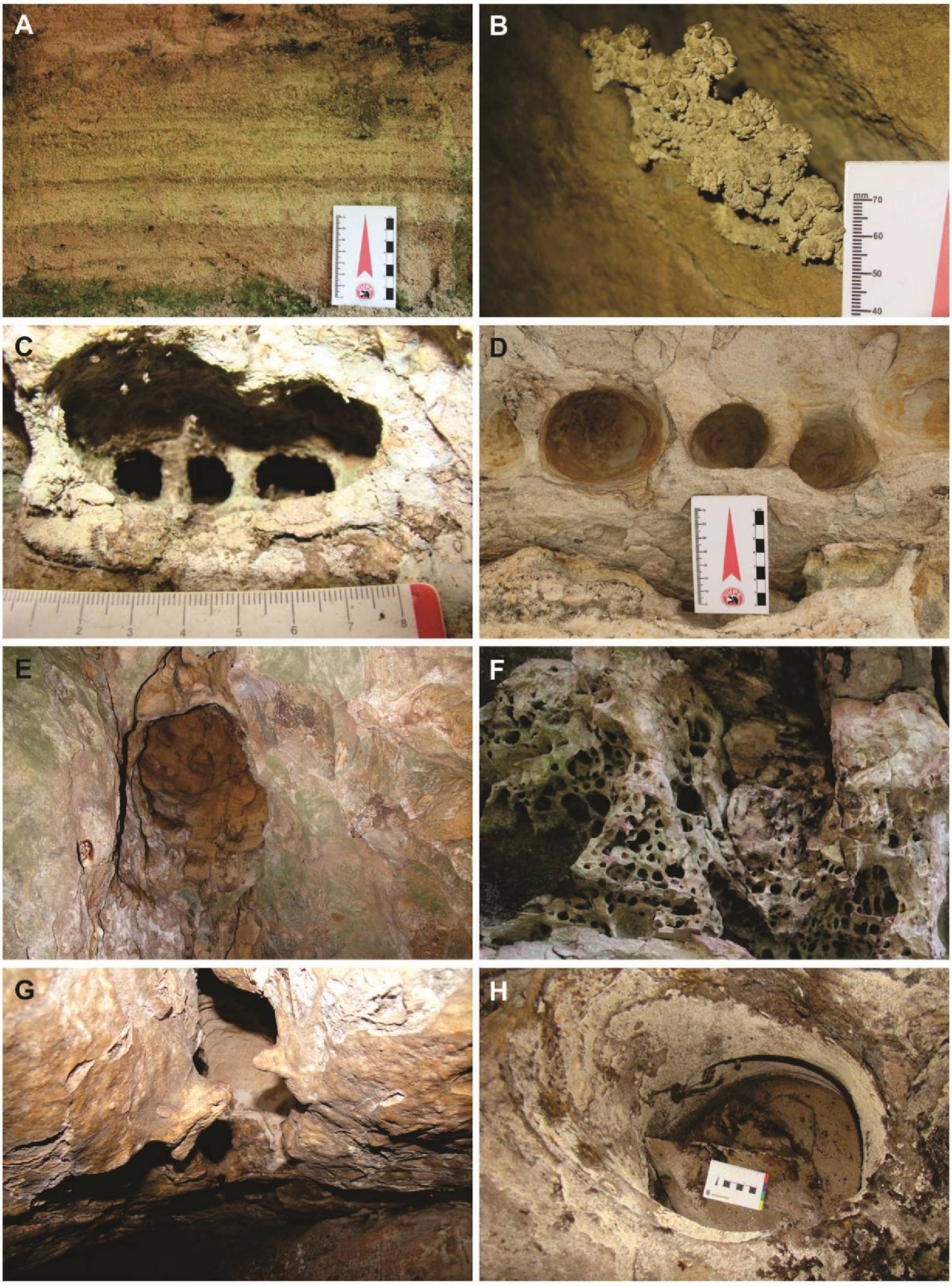


Fig. 2.3 Geodiversity features in the Campos Gerais National Park caves. a) ghost-rock, b) speleothems, c) dissolution conduit, d) dissolution dome, e) balance chimney (source: Rubens Hardt), f) alveoli (honeycomb), g) ceiling half-tube (author: Rubens Hardt), h) plunging-pool.

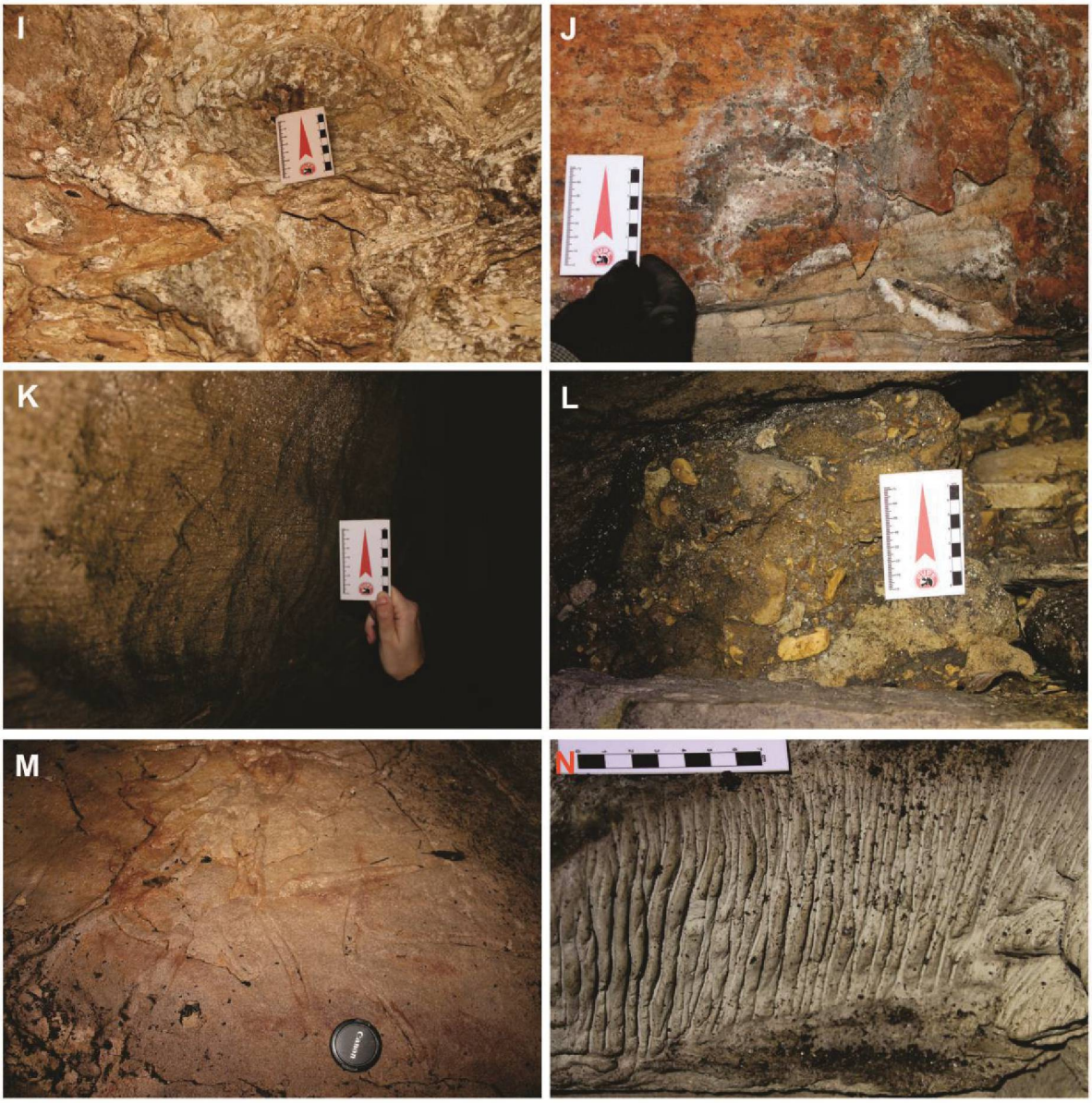


Fig. 2.4 Geodiversity features in the Campos Gerais National Park caves. i) anastomosis, j) incrustation, k) scallops, l) clastic deposits, m) ichnofossils and n) vertical grooves in thin granulation layers (whale's tooth).

The vulnerability and the expropriation priority have five different context levels and to each one was added different values, which are: 4.0 points to very high level, 2.0 points to high level, 1.0 point to intermediary level, 0.5 point to low level and 0.25 point to very low level. To identify the vulnerability the main topic analyzed was the characterization of the cave surroundings, involving the following subtopics: a) activities near the caves (considering a radius of 250 meters from the horizontal projection of the cave), b) immediate surroundings vegetation and c) vegetation conservation status. To classify the expropriation priority was considering the cave vulnerability and sensibility.

In this work, vulnerability is related to the presence of geodiversity features which can be degraded or exposed to total suppression by any kind of disturbance resulted by anthropic activities (considering a radius of 250 meters from the horizontal projection of the cave). Sensibility is the fragilities of the caves that are susceptible to degradation and if there is general divulgation can generate negative impacts, for example, speleothems can be easily destroyed. This analysis also considered the elements of biodiversity, involving abundance, diversity or rarity of species. The value 4.0 was applied to the cave with sensibility present and 0.0 when it was not present.

For each potential to scientific use that the cave presents it was added the 0.5 value. The potential of scientific use analyzed to each one were: a) geomorphological, b) paleontological, c) stratigraphic, d) tectonic, e) hydrogeological, f) speleogenetic, g) geochemical and h) biological.

The method of caves geodiversity evaluation included topics which can influence the determination of relevance in sandstone caves, either for the management in protected areas or to the identification of priority areas for conservation, which are:

a) there is no complete understanding about the karstification process in non-carbonate siliciclastic rocks, mainly on dissolution of quartz and other silicates;

b) the caves present an important geosystemic function, since they are great areas to aquifer recharge;

c) these environments present important interaction between geodiversity and biodiversity, what is showed by features such as speleothems formed by microbial action;

d) with the changes in Brazilian legislation regarding cave protection, it became mandatory to determine speleological relevance in the environmental license process, that is, the natural heritage quantification based on the attribution of numerical values.

Results and discussions

This research was based in the inventory form about the caves geodiversity applied in 33 caves: 28 of them inside the PNCG and the other 5 in its immediate

surroundings (Andorinhas, Poço das Andorinhas, Dos Trezentos, Fenda Guacharos and Sumidouro do Rio Quebra-Perna caves).

Seven caves were not inventoried (Abrigo do Campo Minado, Toca da Catinga, Fenda dos Morcegos, Abismo Cercado Grande 1, Abismo Cercado Grande 2, Abismo Cercado Grande 3 and Gruta Nova Holanda caves) due to the difficulty and/or lack of access authorization by the property owners.

Through the inventory it was possible the characterization of geodiversity elements (geological features present in the caves) and also generate information apparatus about the caves, involving several data, such as: speleometric, geological, hydrographic, biological, land use, potential for use and general features. All the inventory forms together totalize 252 pages of detailed information about these caves. These data may support future research, since it presents a diagnosis of the potentials, occurrence of the features and general characteristics of each cave.

As already pointed out, five items of the inventory were chosen to accomplish the evaluation of the geodiversity of PNCG caves, which are: a) underground geodiversity features, b) vulnerability, c) expropriation priority, d) sensibility and e) potential to scientific use of each cave. These items were evaluated according to predefined numerical parameters, presenting the results in tables 2.2 and 2.3.

Table 2.2: Quantification of underground geodiversity features and vulnerability of PNCG caves.

Caves	Underground geodiversity features	Vulnerability
Andorinhas Cave	5.0	4.0
Sumidouro do Rio Quebra-Perna Cave	5.5	4.0
Poço das Andorinhas Cave	0.0	2.0
Zé Cave	3.5	2.0
Chaminé Cave	3.5	0.5
Dolina do Matador Cave	1.5	2.0
Dos Trezentos Cave	3.0	2.0
Sumidouro do Córrego das Fendas Cave	6.5	0.5
Opilião Cave	1.5	0.5
Fenda Guacharos Cave	2.0	1.0
Sumidouro da Mariquinha Cave	4.5	1.0
Fenda da Freira Cave	3.0	0.5
Fenda Sem Fim Cave	1.5	0.25
Fenda Santa Maria 2 Cave	4.5	0.5
Bugio Cave	2.5	0.5
Furna Passo do Pupo 2 Cave	1.0	0.5
Furna Passo do Pupo 1 Cave	2.5	0.5
Inspirada Cave	0.5	0.5
Buraco do Padre Cave	2.5	1.0
Furna do Anfiteatro Cave	2.0	1.0
Furna Grande Cave	2.0	0.5
Gruta Macarrão Cave	2.5	0.5
Fenda Santa Maria 1 Cave	3.5	0.5
Abismo da Brisa Cave	2.0	0.25

Abismo da Bromélia Cave	0.0	0.25
Fenda dos Tonini Cave	1.5	0.25
Toca do Beco Diagonal Cave	0.5	0.25
Toca do Golpe Cave	0.0	0.25
Gruta da Ricota II Cave	1.0	0.25
Gruta da Ricota I Cave	1.0	0.25
Abismo do Ferla Cave	0.0	0.25
Fenda Pulo do Gato Cave	1.5	0.25
Gruta de Ponta Cabeça Cave	1.0	0.25

Table 2.3: Quantification of expropriation priority, sensibility and potential of scientific use of PNCG caves.

Caves	Expropriation priority	Sensibility	Potential of scientific use
Andorinhas Cave	4.0	4.0	2.5
Sumidouro do Rio Quebra-Perna Cave	4.0	4.0	2.0
Poço das Andorinhas Cave	4.0	4.0	0.5
Zé Cave	2.0	4.0	2.0
Chaminé Cave	2.0	4.0	3.0
Dolina do Matador Cave	2.0	4.0	0.5
Dos Trezentos Cave	2.0	4.0	0.0
Sumidouro do Córrego das Fendas Cave	0.5	4.0	2.5
Opilião Cave	2.0	4.0	1.0
Fenda Guacharos Cave	1.0	4.0	0.5
Sumidouro da Mariquinha Cave	0.5	4.0	1.0
Fenda da Freira Cave	0.5	4.0	1.0
Fenda Sem Fim Cave	0.5	4.0	1.0
Fenda Santa Maria 2 Cave	0.5	4.0	0.5
Bugio Cave	0.5	4.0	0.5
Furna Passo do Pupo 2 Cave	1.0	0.0	3.0
Furna Passo do Pupo 1 Cave	1.0	0.0	2.5
Inspirada Cave	2.0	0.0	1.0
Buraco do Padre Cave	0.5	0.0	1.5
Furna do Anfiteatro Cave	0.25	0.0	1.5
Furna Grande Cave	0.5	0.0	1.5
Gruta Macarrão Cave	0.5	0.0	0.5
Fenda Santa Maria 1 Cave	0.5	0.0	0.5
Abismo da Brisa Cave	0.5	0.0	0.5
Abismo da Bromélia Cave	0.5	0.0	0.5
Fenda dos Tonini Cave	0.25	0.0	0.5
Toca do Beco Diagonal Cave	0.5	0.0	0.0
Toca do Golpe Cave	0.5	0.0	0.0
Gruta da Ricota II Cave	0.5	0.0	0.0
Gruta da Ricota I Cave	0.5	0.0	0.0
Abismo do Ferla Cave	0.5	0.0	0.0
Fenda Pulo do Gato Cave	0.5	0.0	0.0
Gruta de Ponta Cabeça Cave	0.5	0.0	0.0

To quantify and classify each cave as from the evaluation of these five inventory items an integrated analysis of other topics in the inventory form was performed, as shown in table 1.

The caves with most geodiversity features were the Sumidouro do Córrego das Fendas (13), Sumidouro do Rio Quebra-Perna (11), Andorinhas (10), Sumidouro da Mariquinha (9), Fenda Santa Maria 2 (9), Zé (7), Chaminé (7) and Fenda Santa Maria 1 (7) caves.

Concerning the vulnerability of caves to negative environmental impacts, the Andorinhas and the Sumidouro do Rio Quebra-Perna caves are at very high vulnerability level. The Zé, Dolina do Matador, Dos Trezentos and Poço das Andorinhas caves are at high vulnerability level. The Sumidouro da Mariquinha, Fenda Guacharos and Buraco do Padre caves are at intermediary vulnerability level. The remaining caves are at low or very low vulnerability levels.

With reference to the expropriation priority, the Andorinhas, Poço das Andorinhas and the Sumidouro do Rio Quebra-Perna caves, are at very high priority level. The Chaminé, Gruta da Inspirada, Opilião, Dolina do Matador, Dos Trezentos and Zé caves indicate high priority level when analyzing the characterization data of the caves and its immediate surroundings, according to the inventory form. The Furna Passo do Pupo 1, Furna Passo do Pupo 2 and the Fenda Guacharos caves are at intermediary priority level and the remaining caves are at low or very low expropriation priority levels.

About the sensibility context, the Fenda Santa Maria 2, Sumidouro do Córrego das Fendas, Fenda Sem Fim, Fenda da Freira, Bugio, Chaminé, Opilião, Andorinhas, Poço das Andorinhas, Dos Trezentos, Fenda Guacharos, Dolina do Matador, Zé, Sumidouro do Rio Quebra-Perna and Sumidouro da Mariquinha caves, indicate biotic and abiotic elements that classify these caves as sensitive caves.

Even if the cave is not classified as vulnerable (especially in relation to the immediate surrounding activities) nor does there is high expropriation priority, the caves classified as sensitive should be a priority in the management plan of the Campos Gerais National Park and other UC management actions. The sensibility indicates which caves are most prone to negative impacts, with the consequent risk of suppression of the geodiversity and the biodiversity elements. As an example, the Sumidouro do Córrego das Fendas Cave are at low vulnerability and expropriation priority levels, because in its immediate surroundings there are no activities with significant impacts. Also, it is not an expropriation priority area, because there are no conflicts in the land usage of its immediate surroundings. However, the high diversity and abundance of species pointed out by Moss, Lopez and Ferreira (2012) and the large amount of speleothems (as indicate in the inventory form), make reasonable to classify the Sumidouro do Córrego das Fendas as sensitive cave.

About the potential of scientific use, the Chaminé and Furna do Passo do Pupo 2 caves are the best examples pointed out by the quantification, each cave

having six scientific themes. Andorinhas, Sumidouro do Córrego das Fendas and Furna do Passo do Pupo 1 caves, each cave having five scientific themes, being followed by Sumidouro do Rio Quebra-Perna and Zé caves, each with four potential scientific themes.

It was possible to make a ranking (table 2.4) based on quantification of following features: underground geodiversity features, vulnerability, expropriation priority, sensibility and potential of scientific use. With this evaluation it was possible to indicate which caves should be prioritized for conservation, integrating the management of the Campos Gerais National Park.

Table 2.4: PNCG Caves classification (ranking) considering the underground geodiversity features, vulnerability, expropriation priority, sensibility and potential of scientific use.

Caves	Rating
Sumidouro do Rio Quebra-Perna Cave	**19.5**
Andorinhas Cave	**19.5**
Sumidouro do Córrego das Fendas Cave	**14.0**
Zé Cave	**13.5**
Chaminé Cave	**13.0**
Sumidouro da Mariquinha Cave	**11.0**
Dos Trezentos Cave	**11.0**
Poço das Andorinhas Cave	**10.5**
Fenda Santa Maria 2 Cave	**10.0**
Dolina do Matador Cave	**10.0**
Fenda da Freira Cave	**9.0**
Opilião Cave	**9.0**
Fenda Guacharos Cave	**8.5**
Bugio Cave	**8.0**
Fenda Sem Fim Cave	**7.25**
Furna do Passo do Pupo 1 Cave	**6.5**
Buraco do Padre Cave	**5.5**
Furna do Passo do Pupo 2 Cave	**5.5**
Fenda Santa Maria 1 Cave	**5.0**
Furna do Anfiteatro Cave	**4.75**
Furna Grande Cave	**4.5**
Gruta Macarrão Cave	**4.0**
Gruta da Inspirada Cave	**4.0**
Abismo da Brisa Cave	**3.25**
Fenda dos Tonini Cave	**2.5**
Fenda Pulo do Gato Cave	**2.25**
Gruta da Ricota I Cave	**1.75**
Gruta de Ponta Cabeça Cave	**1.75**
Gruta da Ricota II Cave	**1.75**
Abismo da Bromélia Cave	**1.25**
Toca do Beco Diagonal Cave	**1.25**
Abismo do Ferla Cave	**0.75**
Toca do Golpe Cave	**0.75**

The evaluation of the geodiversity in five caves located in the immediate surroundings of the PNCG, allowed to identify areas for the expansion of the protected area. This evaluation can be considered to justify the importance of the

extensions of protected areas. More detailed studies are under development for the delimitation and characterization of these proposals for expansion of the UC, focusing on the protection of the caves which have high geodiversity value.

Conclusions

The Sumidouro do Rio Quebra-Perna Cave and the Andorinhas Cave had the best classification in the geodiversity evaluation, however, these caves are not under jurisprudence of Campos Gerais National Park, but are just near its limits. In other words, these caves are not in integral protection. This shows the importance of the use of geoconservation strategies for the identification of priority areas for conservation, creation or expansion of protected areas. This avoiding that protected areas do not include caves with expressive geodiversity. Perhaps, the exclusion is the result of lack of information about caves during PNCG creation and little attention involving all the geodiversity.

The results demonstrated that the geodiversity evaluation of caves may contribute to the management actions in the Campos Gerais National Park and can be applied to other places that are not in protected areas. This method also can be used in proposal for expansion or creation of new protected areas and determination of speleological relevance according with the current Brazilian law. However, these strategies must considering the environmental particularities of each studied area.

The evaluation through the underground geodiversity inventory and quantification allows to establish a mathematical parameter, assigning a numerical value and, consequently, establishing a classification (ranking) of the caves. It is a management tool that enables the identification of the most expressive environments scientifically, the most threatened. Those, end up demanding urgent management actions.

Nonetheless, when analyzing caves, a systemic approach should be undertaken to evaluate the caves. Even the focus being on geodiversity, the biodiversity elements should be included in the analysis, identifying and evaluating the geodiversity in the context of the provision of ecosystem services and the biodiversity influence on the geodiversity elements, and vice versa. Geological and biological studies developed in these caves have shown that this geo-biodiversity

interaction is inseparable and goes beyond as a simple interaction, it is a mutual dependence.

Similarly, it is a fact that the continuous search for updating and improving the inventory information and the non-subjectivity data and parameters to quantify and qualify should be a priority for geoconservation strategies. In these terms, we must always critically assess studies with this focus.

Acknowledgements

The authors thank the Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza (Boticário Group Foundation for Nature Protection) for the financial support to the research project A006_2015, entitled "Valores da geodiversidade de cavidades subterrâneas no contexto da prestação de serviços ecossistêmicos: subsídios para a elaboração do plano de manejo do Parque Nacional dos Campos Gerais (Paraná) e propostas para ampliação da unidade de conservação" (Caves geodiversity values as a context of the provision of ecosystem services: subsidies for the elaboration of the Campos Gerais National Park management plan - Paraná State - and proposals for expansion of the protected area), study that has resulted in this article.

References

Assine ML (1996) Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil. Tese de doutorado, Programa de Pós- Graduação em Geologia Sedimentar, São Paulo

Assine ML (1999) Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas, no flanco sudeste da bacia do Paraná. Rev. Bras. Geociências, São Paulo. 29: 357-370

Berbert-Born M (2010) Instrução Normativa MMA 2/09 - método de classificação do grau relevância de cavernas aplicado ao licenciamento ambiental: uma prática possível? SBE – Campinas, SP. Espeleo-Tema. 21 (1): 67-103

Borghi L (1993) Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas (Prídoli Devoniano inferior) em afloramentos do bordo leste da bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Brasil (2000) Lei 9.985, DE 18 DE JULHO DE 2000. n° 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm. Accessed 17 April 2017

Brasil (2008). Decreto n° 6640 de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5o e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm. Accessed 16 September 2017

Brilha J (2005) Patrimônio Geológico e Geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. Lisboa: Palimage

Brilha J (2016) Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. The European Association for Conservation of the Geological Heritage. Geoheritage 8:119–134. doi: 10.1007/s12371-014-0139-3

Cendrero A (1996) Propuesta sobre criterios para la clasificación y catalogación del patrimônio geológico. In El patrimonio geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización, Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 29-38

Cendrero A (2000) Patrimonio Geológico; diagnóstico, clasificación y valoración. In Jornadas sobre Patrimonio Geológico y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Medio Ambiente, Serie Monografías, 23-37

Culver DC, Sket B (2000) Hotspots of Subterranean Biodiversity in Caves and Wells. Journal of Cave and Karst Studies 62(1): 11-17

Dias MS (2003) Ficha de caracterização de cavidades. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia, Januária MG. 151-160

Figueiredo LAV, Rasteiro MA, Rodrigues PC (2010) Legislação para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro: mudanças, conflitos e o papel da sociedade civil. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 21(1): 49-65

Ford DC (2006) Karst geomorphology, caves and cave deposits: a review of North American contributions during the past half century. In: Harmon, RS and Wicks CW (Eds.) – Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry. Boulder, Geological Society of America. pp 1-14

Flügel Filho JC, Guimarães GB, Pontes HS (2011) Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa – Paraná. Anais do 31° Congresso Brasileiro de Espeleologia, Ponta Grossa – PR, 19 a 26 de Julho de 2011. Sociedade Brasileira de Espeleologia. 81-85

Flügel Filho JC (2012) Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa (PR): geodiversidade cárstica de um sistema subterrâneo e seus valores. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ganem R S (2009) As cavidades naturais subterrâneas e o decreto nº 6.640/2008. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados. Brasília/DF

Galão, J.E.; Bichuette, M.E., 2015. Taxonomic distinctness and conservation of a new high biodiversity subterranean area in Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 87(1): 209-217. doi: 10.1590/0001-3765201520140312

Gray M (2004) Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature. John Wiley & Sons. U.K. Chichester

GUPE (2017) Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais - ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE). Relatório técnico final. Ponta Grossa (PR)

Lima, FF (2008) Proposta Metodológica para a Inventariação do Patrimônio Geológico Brasileiro. Tese de Mestrado em Patrimônio Geológico e Geoconservação, Universidade do Minho, Escola de Ciências, 91p

Marra RJC (2008) Critérios de relevância para classificação de cavernas no Brasil. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília

Massuqueto LL, Guimarães GB, Pontes HS (2011) Geossítio do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa, PR, Brasil): relevante exemplo de sistema cárstico

nos arenitos da Formação Furnas. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 22(1): pp 099-110

Melo MS, Giannini PCF (2007) Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. Earth Surface Processes and Landforms, 32: 2149-2164. doi:10.1002/esp.1520

Melo MS (2009) Aquífero Furnas - urgência na proteção de mananciais subterrâneos em Ponta Grossa, PR. In.: Anais do Seminário Internacional "Experiências de Agenda 21: Os desafios do nosso tempo". Brasil, Ponta Grossa

Melo MS, Guimarães GB, Pontes HS et al. (2011) Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 22(1): pp 81-97

Melo MS, Guimarães GB, Chinelatto AL et al. (2015) Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences 63: 20-35. doi: 10.1016/j.jsames.2015.06.011

Moreira JC (2012) Interpretative Panels About the Geological Heritage – a Case Study at the Iguassu Falls National Park (Brazil). Geoheritage 4: 127-137. doi: 10.1007/s12371-012-0053-5

Moss DF, Lopez MRQ, Ferreira RL (2012) Fauna de invertebrados em cavernas areníticas do município de Ponta Grossa – PR. Trabalho de conclusão de curso – Bacharelado em Biologia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Palmer AN (2007) Cave geology and speleogenesis over the past 65 years: role of the National Speleological Society in advancing the science. Journal of Cave and Karst Studies, 69(1): 3–12

Pereira PJS (2006) Património geomorfológico: conceptualização, avaliação e divulgação. Aplicação ao Parque Natural de Montesinho. Tese de Doutoramento em Ciências. Universidade do Minho, Portugal, 370p

Pereira RF, Brilha J, Martinez JE (2008) Proposta de enquadramento da geoconservação na legislação ambiental brasileira. In: Memórias e Notícias da Conferência Internacional: As Geociências no Desenvolvimento das Comunidades Lusófanas. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Minerol. Geol., Univ. Coimbra. 3: 491-494

Pereira, RGFA (2010) Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina. (Bahia - Brasil). Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Portugal, 295p

Pontes HS, Rocha HL, Massuqueto LL et al. (2010) Mudanças recentes na circulação subterrânea do rio Quebra- Pedra (furna do Buraco do Padre, Ponta Grossa, Paraná). Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 21(1): pp 7-16

Pontes HS, Melo MS (2011) Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, PR, Brasil: potencial espeleológico, recursos hídricos subterrâneos e riscos geoambientais. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 22(1): pp 111-126

Pontes HS (2016) Patrimônio geológico cárstico em rochas areníticas e políticas públicas de geoconservação, com base em estudo de caso do município de Ponta Grossa (PR). In: anais do 19º Seminário do Programa de Pós-Graduação em Geologia UFPR. Curitiba. pp 22-22

Pontes HS (2017) Feições cársticas em arenitos da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha da Formação Campo Mourão e suas implicações em políticas públicas de geoconservação. In: anais do 20º Seminário do Programa de Pós-Graduação em Geologia UFPR. Curitiba. pp 128-130

Souza-Silva M, Martins RP, Ferreira RL (2015) Cave Conservation Priority Index to Adopt a Rapid Protection Strategy: A Case Study in Brazilian Atlantic Rain Forest. Environmental Management, 55:279-295. doi: 10.1007/s00267-014-0414-8

Souza-Silva M, Ferreira RL (2016) The first two hotspots of subterranean biodiversity in South America. Subterranean Biology 19: 1-21. doi: 10.3897/subtbiol.19.8207

Trajano E, Bichuette ME (2010) Relevância de cavernas: porque estudos ambientais espeleobiológicos não funcionam. Espeleo-Tema: Campinas, SBE, 21(1). 105-112

Trueba JJG, Cañadas ES (2008) La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al Parque Nacional de Los Picos de Europa. Boletín de la A.G.E. N.º 47 - 2008, 175-194

Zalán PV, Wolff S, Conceição JCJ et al. (1990) Bacia do Paraná. In: Gabaglia GPR and Milani EJ. Origem e evolução de Bacias Sedimentares. 3rd edn. Rio de Janeiro: Gávea: pp 135-168

2.2 ESPELEOTEMAS EM CAVERNAS EM QUARTZOARENITOS, MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, SUL DO BRASIL[2]

Henrique Simão Pontes, Luiz Alberto Fernandes, Gilson Burigo Guimarães, Mário Sérgio de Melo, Laís Luana Massuqueto

Resumo

Esta comunicação tem como objetivo caracterizar espeleotemas de cavernas desenvolvidas em quartzoarenitos da Formação Furnas (Siluriano/Devoniano) e da subunidade Vila Velha da Formação Campo Mourão (Carbonífero Superior), na região Sul do Brasil, e discutir a gênese destas feições. O método adotado na pesquisa envolveu caracterização estratigráfica e petrográfica, para identificação do contexto faciológico de ocorrência das feições geológicas, e análises laboratoriais diversas para determinação de composição mineralógica, quantificação da porosidade e identificação de possíveis registros de ação microbiológica na gênese de minerais secundários. Os espeleotemas foram classificados com base na forma, composição e aspectos genéticos, em seis tipos: 1) arborescentes (corais), 2) cogumelos, 3) estalactíticos, 4) estalagmíticos, 5) colunares com crescimento horizontal/ascendente e 6) fibrosos. Os espeleotemas se desenvolvem em todas as fácies areníticas em decorrência da permoporosidade do material, principalmente em pontos com controle de planos de acamamento, estratificações e fraturas, com menor frequência em camadas conglomeráticas e síltico-argilosas (na Formação Furnas). Estas feições são compostas principalmente por sílica (opala-A e sílica criptocristalina) e caulinita, com menor ocorrência de gipsita e óxido amorfo de ferro associado à goethita e hematita. Minerais detríticos, como quartzo e moscovita, também fazem parte da composição dos espeleotemas. Diversos fragmentos de vegetais, invertebrados e diferentes tipos de micro-organismos foram identificados nas amostras estudadas, incluindo bioassinaturas e micro-organismos capazes de precipitar sílica (cianobactérias e diatomáceas) e óxido de ferro (*Gallionella ferrugínea*). Estas bioassinaturas e registros de substâncias poliméricas extracelulares (biofilmes) associadas com espeleotemas no interior de cavernas na área de estudo, são evidências de organomineralização, também chamada

[2] Este artigo está em vias de submissão para a revista científica *International Journal of Speleology*.

mineralização biologicamente induzida. Estes resultados indicam ação biológica presente na gênese destes espeleotemas, o que permite estabelecer novas discussões acerca da ação microbiológica na dissolução e precipitação da sílica e caulinita na área de estudo.

Palavras-chave: microbialitos, cavernas em rochas não carbonáticas, micro-organismos, Formação Furnas, Arenito Vila Velha

Introdução

Em sistemas cársticos o processo de intemperismo químico é um fator determinante para o desenvolvimento de feições e formas de relevo distintas. Mediante diversos processos químicos, por exemplo, hidratação, dissolução, hidrólise e oxidação, íons e moléculas são removidos da superfície dos minerais que compõem a rocha, possibilitando a formação de porosidade secundária por carstificação, com remoção parcial ou total do material rochoso (Dubois et al., 2014). Em ambos os casos, com a remoção e transporte de íons e moléculas, há criação de vazios, como também a formação de espeleotemas, que são depósitos químicos secundários.

Estas feições geológicas geralmente se formam em ambientes subterrâneos, contudo podem apresentar ocorrência em porções superficiais de um sistema cárstico, como em cavernamentos em paredões rochosos. No entanto, há relatos de espeleotemas em áreas que não apresentam relevos cársticos, mas onde atuam processos de intemperismo químico, com precipitação mineral em cavernas e paredes rochosas de superfície, a exemplo de regiões com afloramentos graníticos (*e.g.* Romaní & Rodriguez, 2007) e basálticos (*e.g.* Miller et al., 2014).

Assim, como os espeleotemas não são feições exclusivas de sistemas cársticos, também não são restritos às rochas de composição carbonática. O desenvolvimento destas feições é completamente possível em rochas com baixa solubilidade, como nas de composição siliciclástica (*e.g.* arenitos quartzosos) e quartzitos. No entanto, há diversos exemplos de sistemas cársticos não carbonáticos formados em quartzitos e quartzoarenitos, repletos de feições, formas, organização espacial e funcionamento característicos deste tipo de relevo.

Nos quartzoarenitos de cimentação não carbonáticas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha há processos de carstificação envolvendo a dissolução de minerais componentes, incluindo grãos de quartzo. Nestas rochas estão registradas centenas de cavernas, dolinas, sistemas de drenagem subterrânea, com sumidouros, ressurgências e outras feições geológicas típicas de relevos cársticos (como rochas alteradas *in situ*, canais de teto e de parede, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos).

Além destas feições, os espeleotemas também estão presentes nestas unidades geológicas, principalmente no interior de cavernas. Sobre as rochas da Formação Furnas a ocorrência dos depósitos minerais secundários foram registrados em trabalhos de diversos autores, a exemplo de Spinardi e Lopes (1990), Budny (2004), Melo e Giannini (2007), Pontes et al. (2008), Melo (2010), Pontes (2010), Massuqueto (2010), Melo et al. (2011), Hardt (2011), Flügel Filho (2012), Pontes (2014) e Melo et al. (2015). No Arenito Vila Velha há poucas menções sobre estes depósitos secundários. Melo (2006), Letenski et al. (2009) e Letenski et al. (2011) citam a ocorrência de microespeleotemas em cavernamentos de afloramentos rochosos de superfície. Pontes et al. (2012) relatam a ocorrência de espeleotemas de até 15 centímetros de comprimento em uma cavidade subterrânea desenvolvida nestes arenitos.

Os espeleotemas formados em quartzoarenitos são considerados feições que, na maioria dos casos, possuem características distintas quando comparadas com os correspondentes desenvolvidos em rochas carbonáticas. Nos aspectos de abundância e tamanho geralmente são menores em relação aos espeleotemas desenvolvidos em rochas carbonáticas. No entanto, os depósitos químicos secundários em quartzoarenitos são uma das mais intrigantes feições geológicas, principalmente devido a sua composição e gênese.

Flügel Filho et al. (2012) e Flügel Filho (2012) apresentaram uma classificação preliminar para os espeleotemas da Formação Furnas, baseado na forma das feições. Melo et al. (2015) indicaram composição silicosa para estes espeleotemas, com base em análises de espectrometria de energia dispersiva (EED). Apenas o trabalho de Melo et al. (2015) apresenta análise química de um depósito mineral secundário nas rochas da Formação Furnas, contudo não corresponde aos espeleotemas apresentados neste trabalho. Não há nenhum tipo de estudo específico sobre os espeleotemas da subunidade Arenito Vila Velha.

Estas lacunas de informações sobre os depósitos químicos secundários presentes nos quartzoarenitos da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha (Formação Campo Mourão) justificou a necessidade de estudos detalhados, envolvendo análises microscópicas, químicas e petrográficas, juntamente com levantamentos estratigráficos para identificação de possíveis correlações entre o desenvolvimento destas feições e características faciológicas e diagenéticas dos arenitos. Este artigo tem como objetivo caracterizar os espeleotemas de cavernas formadas nestas duas unidades geológicas, a fim de discutir a gênese destas feições e a possível influência de micro-organismos na dissolução do quartzo e do cimento caulinítico, bem como na precipitação de minerais secundários.

Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em cavidades subterrâneas da Formação Furnas (Siluriano/Devoniano e subunidade Arenito Vila Velha da Formação Campo Mourão (Carbonífero/Permiano), situadas na borda leste da Bacia do Paraná, no município de Ponta Grossa (estado do Paraná), na região Sul do Brasil (fig 3.1).

Na área de estudo há o registro de 107 cavernas (103 na Formação Furnas e quatro no Arenito Vila Velha), centenas de dolinas e muitos sumidouros, ressurgências, rios subterrâneos, várias feições erosivas (espeleogens) e rochas alteradas (*in situ*), conjunto de feições e formas típicas de relevos cársticos. Nestes quartzoarenitos de composição não carbonática o processo cárstico está presente, com a dissolução do cimento caulinítico e dos grãos de quartzo, conforme já salientado por Pontes (2010), Melo et al. (2011) e Melo et al. (2015).

O clima da área é caracterizado como subtropical, do tipo Cfb de acordo com a classificação climática de Köppen, que corresponde a clima temperado com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18ºC e temperatura média no mês mais quente abaixo de 22ºC. Os verões são frescos, sem estação seca definida, chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com precipitação média anual entre 1400 a 1800 mm e valores médios de umidade relativa do ar entre 75 a 80%. (Cruz, 2007). Merece destaque que a área de estudo tem seu limite leste definido pela Escarpa Devoniana e este degrau topográfico, que separa o primeiro do segundo planalto paranaense, possibilita um aumento localizado nos índices de precipitação e umidade.

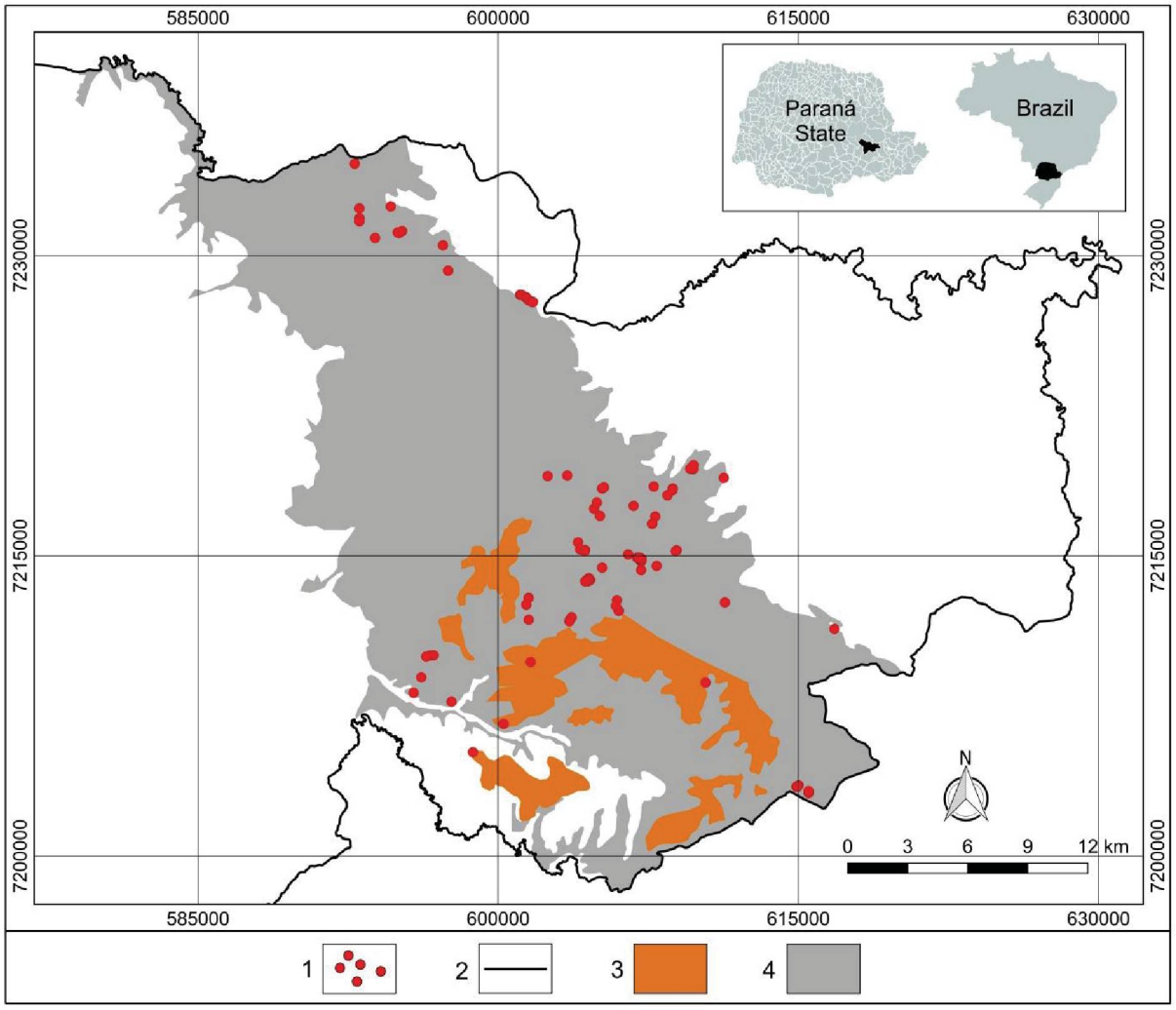


Fig. 3.1. Localização da área de estudo. Convenções cartográficas: 1- cavidades subterrâneas; 2- limite municipal de Ponta Grossa; 3- área de afloramento do Grupo Itararé contendo a subunidade Arenito Vila Velha; 4: área de afloramento da Formação Furnas.

Aspectos geológicos

A área de estudo inclui duas unidades geológicas compostas essencialmente por quartzoarenitos, a Formação Furnas (Grupo Paraná), que ocupa aproximadamente 85% do total da área de estudo, e a subunidade Vila Velha da Formação Campo Mourão (Grupo Itararé), com 15%.

Os sedimentos da Formação Furnas acumularam-se entre 421-395 Ma (Siluriano/Devoniano) (Borghi, 1993; Assine, 1999; Milani et al., 2007). É constituída principalmente por quartzoarenitos, com grãos que variam de médios a grossos, cimentados por caulinita e illita (Assine, 1996; Melo & Giannini, 2007 e Milani et al., 2007). Os arenitos apresentam estratificações plano-paralelas e cruzadas, e comumente, intercalações de espessura geralmente decimétrica de silte e argila. Na

base da formação há camadas conglomeráticas que ultrapassam um metro de espessura.

De acordo com Assine (1996) os arenitos ocorrem em estratos de espessuras de 0,5 a 5 metros de forma tabular, lenticular e cuneiforme, exibindo marcante estratificação cruzada. Este mesmo autor propôs a subdivisão da Formação Furnas em unidades inferior, média e superior. Lobato & Borghi (2005) propuseram outra subdivisão estratigráfica, na qual a formação foi dividida em quatro unidades, sendo que o intervalo II de Assine (1996) foi dividido em partes A e B.

Bergamaschi (1992), Assine et al. (1994) e Assine (1996) sugeriram que a Formação Furnas foi depositada sobre condições de plataforma marinha e ambientes deltaicos. Entretanto, há muita discussão sobre a natureza da sedimentação destas unidades, principalmente sua seção conglomerática inferior, totalmente sem fósseis (Milani et al., 2007). Alguns autores afirmam que a deposição da Formação Furnas ocorreu em sistemas fluviais de canais anastomosados (Schneider et al., 1974; Zalán et al., 1987) e também por um grande sistema fluvial de rios entrelaçados (Pavan, 2015; Araújo, 2016).

O Arenito Vila Velha assenta-se concordantemente sobre diamictitos, ritmitos glaciais e argilitos da Formação Campo Mourão. Esta subunidade é essencialmente composta por arenitos avermelhados com cimento ferruginoso, seleção variada, de granulação fina a grossa, com seixos na base. Maack (1946) identificou quartzo, feldspato (em parte caulinizado), moscovita, clorita e granada nestes arenitos. Entretanto, Melo & Coimbra (1996) e Melo et al. (2007) apontaram que estes minerais ocorrem em camadas abaixo dos arenitos mais típicos do relevo de Vila Velha, e que este litotipo é composto apenas por quartzoarenitos, com alguns grãos policristalinos (quartzito) e fragmentos líticos de lamitos arenosos, que constituem pseudomatriz gerada por deformação e esmagamento.

Schneider et al. (1974) dividiram o Grupo Itararé nas formações Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul. Entretanto França & Potter (1988) apresentaram outra proposta, subdividindo-o nas formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba, classificação adotada na presente pesquisa.

Maack (1946), Melo & Coimbra (1996), França et al. (1996) e Melo et al. (2007) relataram que estes arenitos têm estratificação plano-paralela incipiente, frequente aspecto maciço, estratificação cruzada de baixo ângulo, marcas

onduladas e intraclastos argilosos. De acordo com França et al. (1996) estes arenitos exibem os famosos relevos ruiniformes de Vila Velha, apresentando mais de 30 metros de espessura e de centenas a mais de mil metros de extensão lateral. Melo et al. (2007) afirmaram que o Arenito Vila Velha tem 50 metros de espessura. No entanto, Maack (1946) considerou que a subunidade tem 65 metros de espessura e Vesely (2011) incluiu mais um intervalo arenítico com 30 metros de espessura, chamado *arenitos basais*.

De acordo com Milani et al. (1994) o ambiente de deposição do Grupo Itararé foi flúvio-glacial, marinho-glacial e marinho. França et al. (1996) consideraram o Arenito Vila Velha como depositado na forma de lobos subaquosos, como produtos de fluxos gravitacionais densos iniciados na base de geleiras. A ocorrência de estratificação cruzada de baixo ângulo e perfurações verticais e horizontais permitem interpretar sedimentação marinha rasa, influenciada por marés (Canuto et al., 1997). Vesely (2011) identificou superfícies com sulcos e cristas glaciais na sucessão estratigráfica denominada Arenito Vila Velha, e sugeriu a passagem de gelo sobre sedimentos não consolidados, caracterizando assim um ambiente proglacial.

A idade atribuída ao Arenito Vila Velha pertence ao Carbonífero Superior, com base em fósseis encontrados em folhelhos intercalados no Arenito Lapa (outra subunidade da Formação Campo Mourão), e mediante correlação com rochas da Formação Lagoa Azul (Milani et al., 1994).

O relevo das áreas de exposição da Formação Furnas e Arenito Vila Velha apresenta importante controle por estruturas tectônicas, associadas com *canyons* e fendas, segundo duas direções principais, relacionadas com o Arco de Ponta Grossa (NW-SE) e com o embasamento proterozoico (NE-SW), reativado pelo arqueamento crustal durante o Mesozoico, conforme Zalán et al. (1990). As estruturas tectônicas facilitam o intemperismo e a ação erosiva da água, em ambiente superficial e subterrâneo, tornando estas descontinuidades zonas preferenciais para o desenvolvimento de condutos e galerias subterrâneas.

Métodos

Os levantamentos para a pesquisa constaram de trabalhos de campo para a coleta de informações sobre os litotipos, elaboração de seções geológicas e

identificação de feições de deposição química secundária em cavidades subterrâneas e cavernamentos em paredões rochosos superficiais. A identificação de ocorrências de espeleotemas orientou-se em inventário da geodiversidade das cavidades naturais subterrâneas da área de estudo realizado por Pontes et al. (2018a, b). A fase laboratorial envolveu interpretações estratigráficas, petrográficas, caracterização faciológica e análises químicas.

A possibilidade de correlação entre o desenvolvimento das feições e características estratigráficas e litológicas dos arenitos baseou-se na verificação por meio de seções geológicas em locais com ocorrência de espeleotemas. Seis atributos foram averiguados: 1) composição mineralógica e parâmetros texturais, como composição de componentes, granulação e seleção; 2) porosidade; 3) estruturas sedimentares; 4) estruturas tectônicas; 5) feições de intemperismo (rocha alterada *in situ*); 6) padrão de ocorrência.

Foram realizadas diversas análises laboratoriais para caracterização dos espeleotemas (tabela 3.1). Para analisar a estrutura interna dos depósitos minerais secundários, além de identificar componentes com características distintas (principalmente materiais de origem biológica), primeiramente utilizou-se microscopia de luz transmitida e, posteriormente, microscopia eletrônica de varredura para melhor observação. Os valores de porosidade total dos espeleotemas foram obtidos mediante uso de técnicas de interpretação de imagens binárias geradas pela microtomografia computadorizada (micro-CT).

Para identificar possíveis contribuições de micro-organismos na gênese dos depósitos minerais secundários foram realizadas análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV). Este estágio considerou similaridades físico-químicas (principalmente forma, cor e composição química) entre os espeleotemas desenvolvidos nas cavernas estudadas com os encontrados nas maiores cavidades dos arenitos pré-cambrianos dos Tepuis Chimantá, na Venezuela. Conforme salientam Aubrecht et al. (2008) e Lundberg et al. (2010) os espeleotemas dos Tepuis, chamados de microbialitos ou bioespeleotemas, são formados devido à ação de micro-organismos.

Para o controle e identificação dos elementos químicos dos materiais observados nas análises de MEV utilizou-se espectrometria de energia dispersiva (EED). Já a composição química dos espeleotemas foi definida a partir da difratometria de raios X (DRX).

Tabela 3.1. Detalhamento das amostras e análises realizadas.

	Identificação	Material	Análises
1	BP-01	espeleotema cogumelo	DRX
2	BP-02	espeleotema cogumelo	MEV/EED
3	CC-01	espeleotema arborescente	microscopia petrográfica
4	CC-02	espeleotema estalactítico	microscopia petrográfica
5	CC-03	espeleotema estalactítico	MEV/EED
6	CC-04	espeleotema arborescente	microscopia petrográfica
7	CC-05	espeleotema arborescente	microscopia petrográfica
8	CC-06	espeleotema arborescente	MEV/EED
9	CZ-01-A	espeleotema estalagmítico	microscopia petrográfica
10	CZ-01-B	espeleotema estalagmítico	MEV/EED
11	GI-01	espeleotema arborescente	MEV/EED/DRX
12	SCF-01	espeleotema colunar com crescimento horizontal/ascendente	MEV/EED e DRX
13	SCF-02	espeleotema colunar com crescimento horizontal/ascendente	microscopia petrográfica
14	SCF-03-A	espeleotema colunar com crescimento horizontal/ascendente	micro-CT
15	SCF-03-B	espeleotema colunar com crescimento horizontal/ascendente	microscopia petrográfica
16	SCF-04	espeleotema cogumelo	MEV/EED
17	SCF-05	micro-terraço tipo *flowstone* (micro *gours*)	MEV/EED
18	FSF	espeleotema fibroso	DRX
1	GAPS-01-A	espeleotema arborescente	microscopia petrográfica, micro-CT e DRX
2	GAPS-01-B	espeleotema arborescente	MEV/EED
3	GAPS-02-A	espeleotema cogumelo	DRX
4	GAPS-02-B	espeleotema cogumelo	MEV/EED

	Amostras da Formação Furnas		**Amostras do Arenito Vila Velha**

Quatro amostras de espeleotemas encontrados no Arenito Vila Velha foram analisadas, todas coletadas na Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa, situada no interior do Parque Estadual de Vila Velha, uma área protegida do estado do Paraná. Estudos específicos também foram desenvolvidos em dezoito amostras de depósitos

químicos secundários nos arenitos da Formação Furnas, incluindo uma feição denominada escorrimento de rocha (microterraços ou *micro-gours*), que não foi caracterizada como espeleotema. Os pontos de coleta das amostras da Formação Furnas estão todos situados no Parque Nacional dos Campos Gerais, nos seguintes locais: Furna do Buraco do Padre, Caverna da Chaminé, Gruta da Inspirada, Caverna do Zé, Sumidouro do Córrego das Fendas e Fenda Sem Fim.

Resultados e discussões

Classificação

Os espeleotemas ocorrem praticamente em todas as cavidades subterrâneas da área de estudo, como também em cavernamentos em afloramentos superficiais (alvéolos, reentrâncias, dutos). A classificação apresentada por Flügel Filho et al. (2012) e Flügel Filho (2012) foi revisada e modificada, resultando em seis variedades: 1) arborescentes (corais), 2) cogumelos, 3) estalactíticos, 4) estalagmíticos, 5) colunares com crescimento horizontal/ascendente e 6) fibrosos (fig. 3.2). Embora pequenos em tamanho, se comparados com os carbonáticos, variando de poucos milímetros até 15 centímetros de comprimento, os espeleotemas são abundantes e podem ser encontrados facilmente. Os espeleotemas do tipo fibrosos são exceção, pois são pequenos e de rara ocorrência.

Os arborescentes ou corais são os mais comuns. Trata-se de espeleotemas que apresentam uma estrutura principal que se ramifica em vários outros segmentos, constituindo uma forma dendrítica, geralmente com aspecto irregular e superfície rugosa. Os cogumelos são espeleotemas que se assemelham com a estrutura denominada píleo (chapéu) de determinados tipos de fungos (como os champignons), geralmente apresentam formato convexo. Podem apresentar superfícies rugosas ou lisas e se desenvolvem isoladamente ou em grupos.

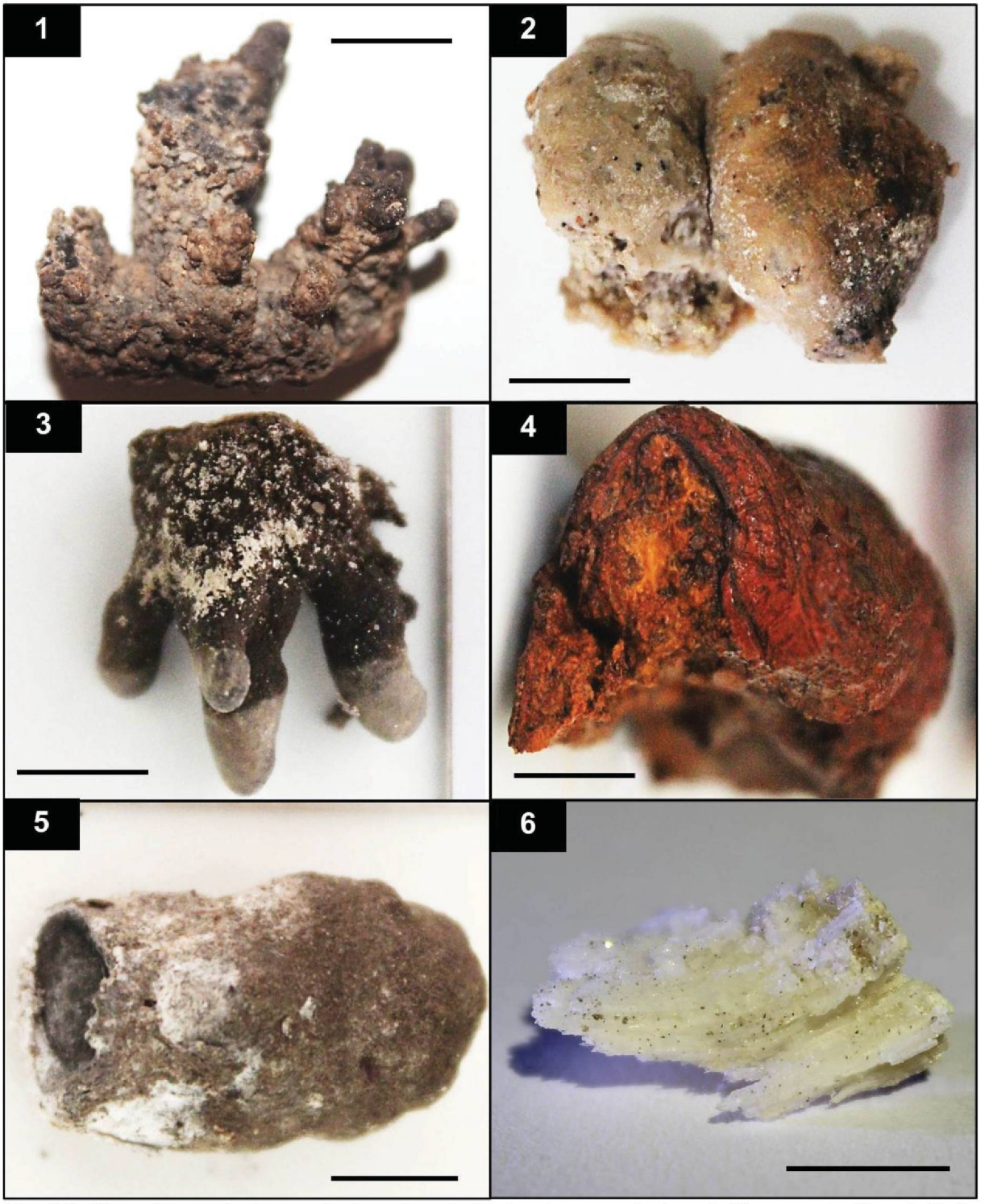


Fig. 3.2. Tipos de espeleotemas da área de estudo: 1- arborescente (coral) (Caverna da Chaminé), 2- cogumelo (Buraco do Padre), 3- estalactítico (Caverna da Chaminé), 4- estalagmítico (Caverna do Zé), 5- colunar com crescimento horizontal/ascendente (Sumidouro do Córrego das Fendas) e 6- fibroso (Fenda Sem Fim). Escala gráfica das fotos: 1 centímetro.

Os espeleotemas do tipo estalactítico apresentam forma colunar, geralmente cônica, são pendentes a partir do teto das cavernas, apresentam textura superficial rugosa ou lisa. Os estalagmíticos são feições que se elevam do piso das cavidades,

possuem forma convexa e geralmente estão associados a gotejamentos, apresentam superfície rugosa ou lisa e cor vermelha predominantemente, com porções alaranjadas e pretas. Os espeleotemas do tipo colunares de crescimento horizontal/ascendente podem se formar em paredes e pisos de cavernas, geralmente assumem forma colunar com superfícies rugosas. Os fibrosos ocorrem como cristais filamentosos agrupados, apresentam superfície irregular e cor branca amarelada. Com exceção dos estalagmíticos e filamentosos, os demais tipos de espeleotemas podem assumir cores em várias tonalidades de branco, cinza e marrom. Contudo, a questão da cor está relacionada com a composição mineral (por exemplo, presença de elementos corantes, tais como óxidos de ferro) e não com a forma do espeleotema.

Composição e aspectos genéticos

Silício e alumínio são presentes na composição dos espeleotemas (arborescentes, cogumelos, estalactíticos e colunares com crescimento horizontal/ascendente) dos quartzoarenitos da Formação Furnas (fig. 3.3a) assim como nos desenvolvidos no Arenito Vila Velha (fig. 3.3b). Melo et al. (2015) apontaram que estas variedades de espeleotemas formados na Formação Furnas são compostas por sílica criptocristalina a amorfa e caulinita criptocristalina. No presente estudo, os diagnósticos obtidos a partir da difratometria de raios X indicam a presença de opala-A, sílica criptocristalina e caulinita criptocristalina (fig. 3.3c, d, e, f). A opala-A foi diagnosticada através da comparação de análises semelhantes em trabalhos sobre espeleotemas silicosos em outras regiões do globo (*e.g.* Finlayson & Webb, 1985; Wray, 1999; e Aubrech et al., 2008). Os picos de quartzo presentes nos gráficos, além de serem resultados da presença de quartzo detrítico, representam sílica criptocristlalina, podendo se tratar de calcedônia.

A moscovita, apontada como mineral constituinte, também é fragmento detrítico, provenientes de camadas formadas por silte e argila. A água remove e transporta estes minerais e a presença de biofilme permite que estes cristais fiquem aprisionados nos espeleotemas.

Diversos estudos apontam que ciclos contínuos de evaporação desencadeiam a precipitação da sílica, e que os espeleotemas se formam apenas em áreas com circulação de ar livre e atmosfera não saturada (*e. g.* Webb e

Finlayson, 1984; Hill e Forti 1997; Wray, 1999). Contudo, grupos de micro-organismos filamentosos globulares (cianobactérias) foram encontrados nas amostras estudadas, formando substâncias extracelulares poliméricas (biofilmes) (fig. 3.3g). Estas bioassinaturas mostram feições resultadas da ação microbiológica, e isto permite classificar estes depósitos químicos secundários como microbialitos ou bioespeleotemas. Neste caso, a gênese destas feições pode ser influenciada ou induzida por micro-organismos.

Vários estudos mostram a influência de atividades metabólicas de micro-organismos na precipitação da sílica *(e.g.* Cañaveras et al., 2001; Aubrecht et al., 2008). Da mesma forma, há micro-organismos capazes de modificar as condições químicas em pontos específicos da rocha, na escala de microambientes (milimétrica a centimétrica), possibilitando a dissolução de sílica (Bennet, 1991; Ehrlich, 1996, Brehm et al., 2005; Romaní & Rodriguez, 2007; Miot et al., 2014).

De acordo com Baskar et al. (2007); Sallstedt et al. (2014); Zepeda Mendoza et al. (2016), os biofilmes têm um importante papel na gênese de alguns espeleotemas. A presença de biofilmes associados com os espeleotemas de cavernas na área de estudo, por exemplo, na Furna do Buraco do Padre (Formação Furnas) e Gruta Cambiju I (Arenito Vila Velha), é outro indício que sugere a ação biológica no processo de formação destas feições geológicas (fig. 3.3h).

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram ser um método eficiente para detectar bioassinaturas, conforme afirmado por Miot et al. (2014). As imagens obtidas através do MEV mostraram diversas bioassinaturas (moldes, fragmentos ou até mesmo estruturas completas de antigos micro-organismos) nos espeleotemas da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha. Estas marcas biológicas estão presentes em porções com estrutura maciça, composta por sílica, sendo considerados os mais importantes registros da presença e ação de micro-organismos (fig. 3.4a, b). Alguns espeleotemas apresentam cianobactérias agrupadas, constituindo filamentos segmentados por glóbulos, formando biofilmes (fig. 3.4c, d).

Diversas amostras de espeleotemas apresentaram micro-organismos inteiramente preservados, constituindo possíveis estruturas fósseis (fig. 3.4e). Além disso, outros organismos biológicos foram aprisionados durante a precipitação química, sobretudo no processo inicial de formação. Nos espeleotemas foram encontrados também restos de materiais biológicos, como fragmentos de vegetais,

invertebrados (carapaças inteiras ou moldes), diatomáceas, amoebas e muitos tipos de esporos de fungos e plantas (fig. 3.4f, g, h, i) (fig. 3.5a, b, c, d, e, f, g, h).

As substâncias extracelulares poliméricas são capazes de aderir materiais que tocam o biofilme, incluindo grãos minerais e diversos elementos biológicos, bem como precipitar minerais secundários que compõem os espeleotemas, incluindo sílica, caulinita e óxidos de ferro (fig. 3.6). Os espeleotemas da área de estudo podem ser considerados como depósitos químicos secundários eventualmente com fósseis, capazes de preservar registros paleoecológicos e paleoambientais de enorme valor científico para a região dos Campos Gerais.

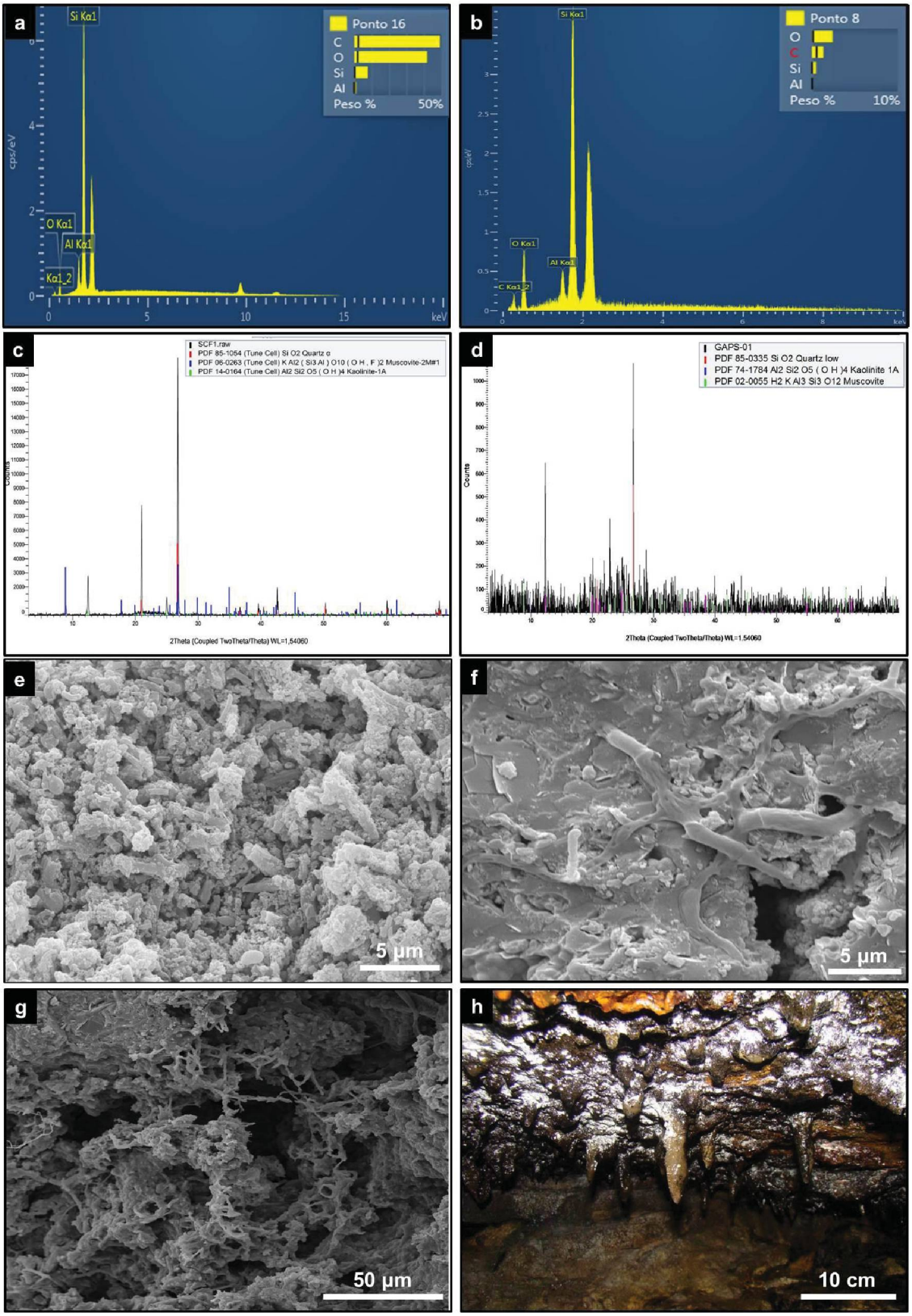


Fig. 3.3. Análise de EED de espeleotema da Gruta da Inspirada (a), na Formação Furnas, e Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa (b), no Arenito Vila Velha, mostrando a presença de silício e alumínio. A análise de DRX indicou presença de opala A e caulinita como minerais componentes de espeleotemas do Sumidouro do Córrego das Fendas (c), na Formação Furnas, e Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa (d), no Arenito Vila Velha. Espeleotemas compostos por sílica criptocristalina (e, f). Imagens de MEV mostrando cianobactérias formando biofilme (g). Espeleotemas associados à biofilmes na Gruta Cambiju I, no Arenito Vila Velha (h).

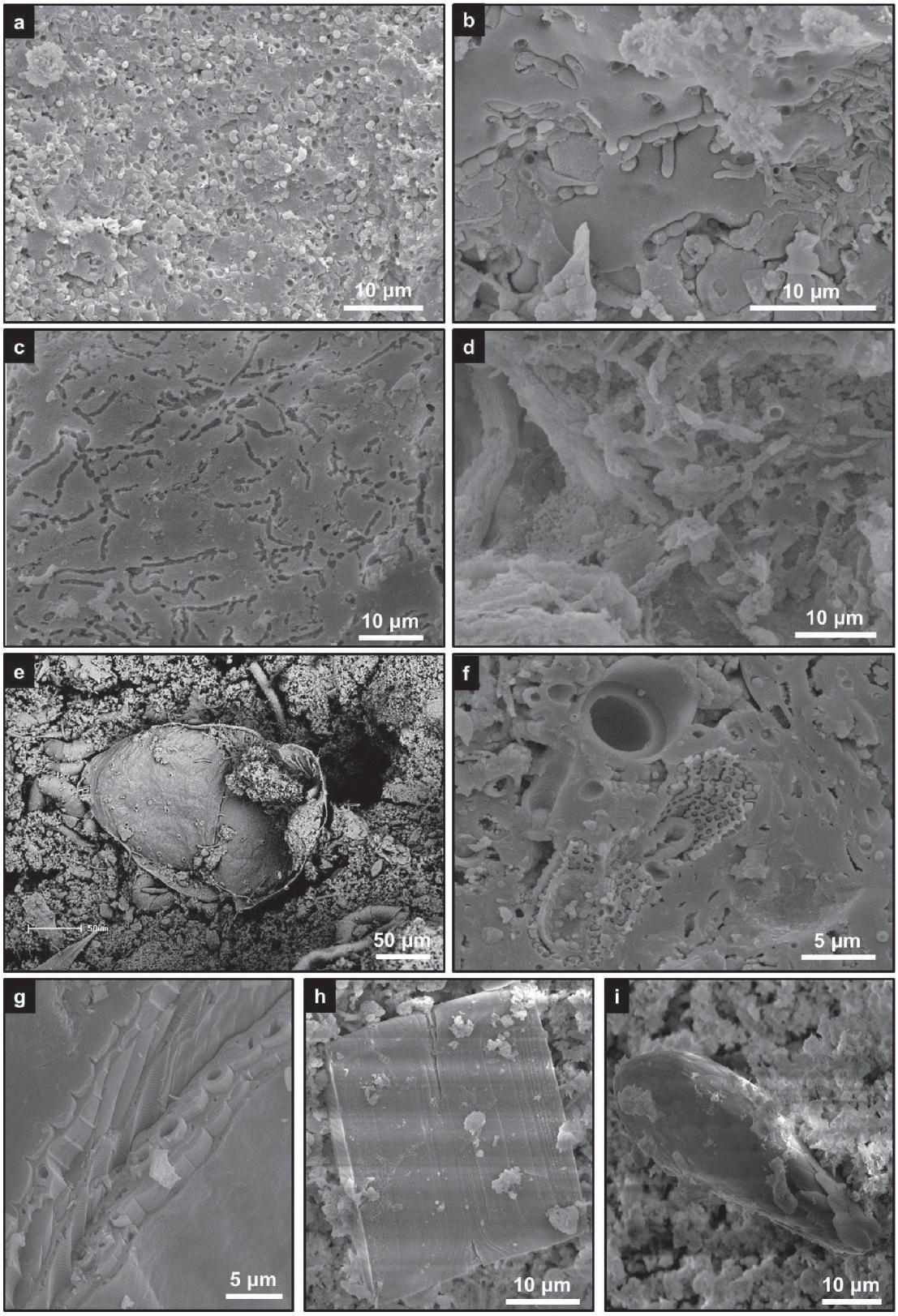


Fig. 3.4. Imagens secundárias de elétrons geradas por MEV mostrando elementos biológicos em espeleotemas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha: bacteria cocci (ou archea) (a); diferentes registros de cianobactérias, agrupadas como filamentos globulares cercadas por precipitação secundária de sília e *Bacillus* sp. na direita da imagem (b), bioassinaturas em precipitação secundária de sílica (c) e vários organismos microbiológicos formando biofilme (d); Ácaro completamente silicificado (e); frústula de diatomácea *Aulacoseira* sp. (f); fragmento vegetal semelhante a uma micro folha (g); diatomácea não identificada (h) e; Testate Amoebae *Euglypha* sp. (i).

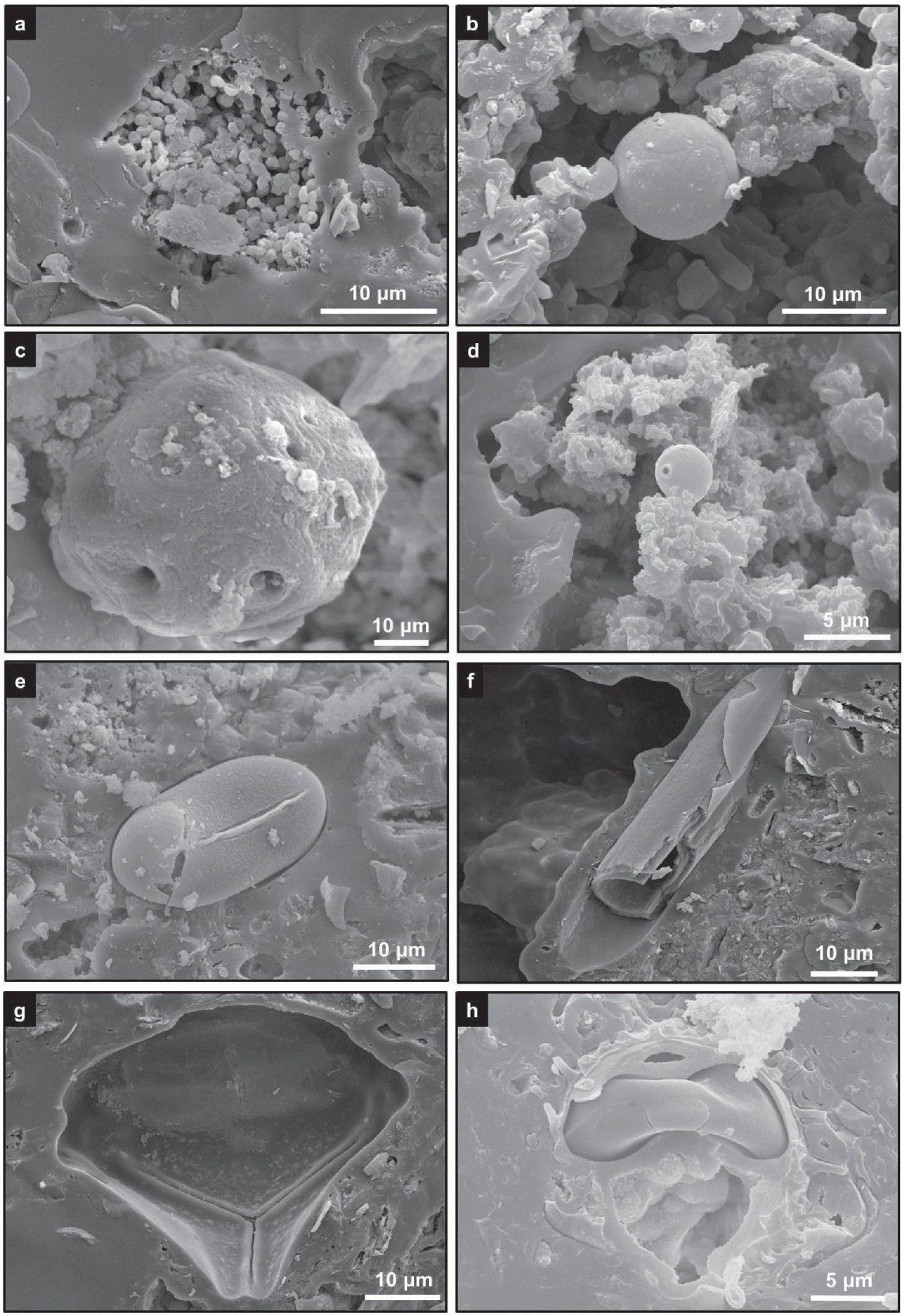


Fig. 3.5. Espeleotemas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha mostrando materiais biológicos totalmente silicificados: agrupamento de micro-organismos ocupando um poro (a); prováveis esporos não identificados de fungos ou plantas (b, c, d, e); fragmento vegetal (f); molde de micro-organismo (g); estrutura parcialmente preservada de micro-organismo não identificado (h).

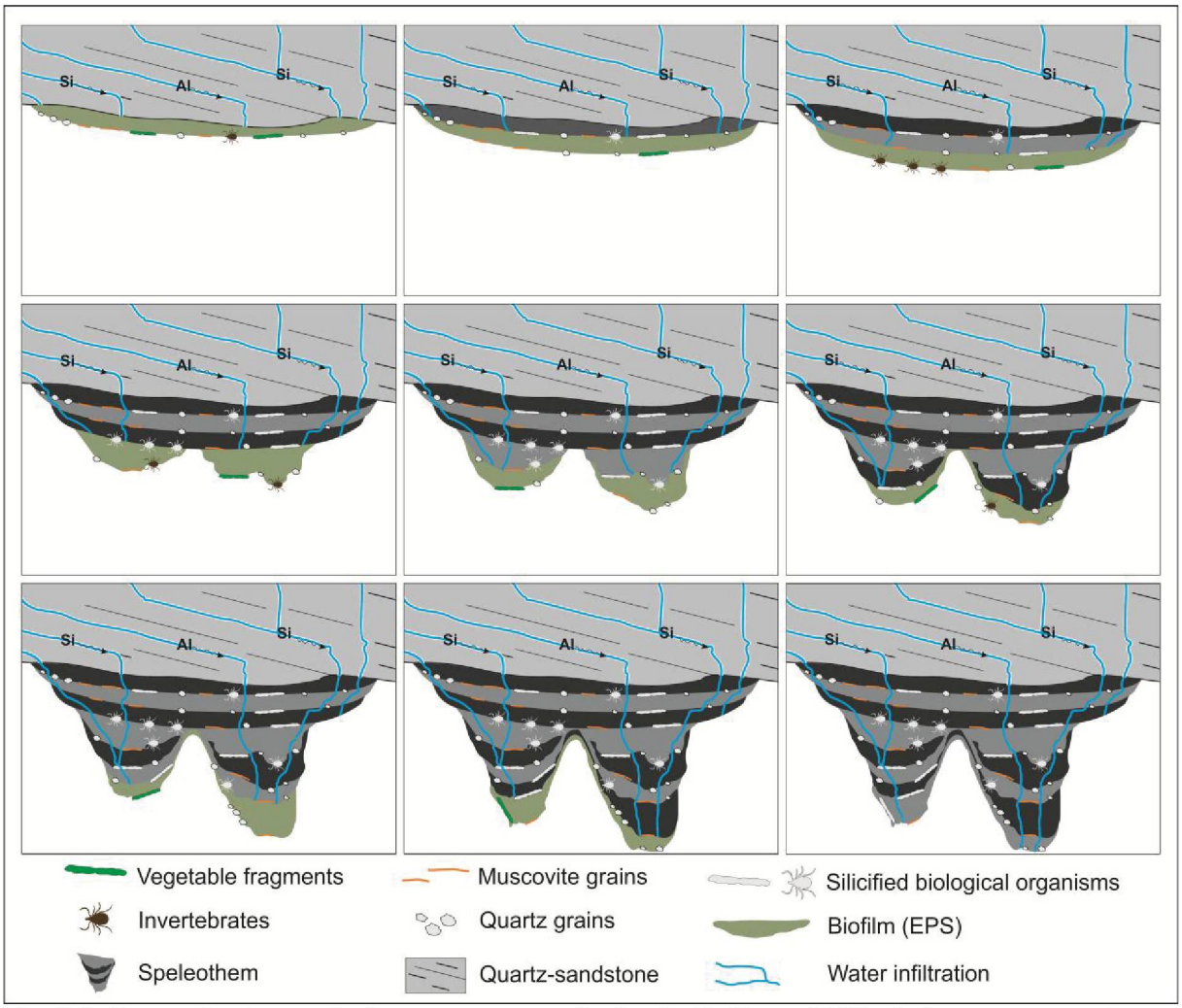


Fig. 3.6. Formação de espeleotemas com a mediação de biofilmes (EPS). A água que percola nos quartzoarenitos, remove íons e moléculas da superfície dos minerais componentes da rocha mediante diversos processos químicos. Esta solução chega até o biofilme, onde processos metabólicos de micro-organismos precipitam os elementos químicos que estavam em solução, dando origem aos bioespeleotemas.

Além dos micro-organismos, o desenvolvimento de alguns espeleotemas pode ser influenciado por teia de aranhas, principalmente os depósitos do tipo arborescentes (corais). Observações de campo permitiram identificar atividades de diferentes espécies de aranhas sobre estes espeleotemas. Aubrecht et al. (2008) e Lundberg et al. (2010) relataram casos de precipitação mineral em fios de teias de aranhas, formando o que os autores chamam de *cobweb stalactite*. Precipitações de sílica sobre fios de teias de aranhas foram identificadas nos espeleotemas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha, evidenciando que estes fios podem servir como canais preferenciais para a incrustação e precipitação mineral (fig. 3.7a, b). Estruturas alongadas com 5 a 10 µm de diâmetro, interpretadas como fios produzidos por aranhas, foram identificadas em seções petrográficas. De acordo

com Pontes et al. (2018a) pelo menos cinco famílias de aranhas distribuídas em cinco morfoespécies produzem teias nestes espeleotemas.

Os espeleotemas do tipo estalagmítico foram identificados na Caverna do Zé e Caverna das Andorinhas (Formação Furnas), resultado da dissolução de incrustações ferruginosas em fraturas e falhas. Estes depósitos são totalmente formados por óxido de ferro, especificamente óxido amorfo de ferro associado à goethita e hematita (fig. 3.7c, d). A água rica em ferro solubilizado escorre do teto da caverna, acumulando estes componentes no chão. Este tipo de espeleotema também pode ser classificado como microbialito devido à identificação de inúmeros aglomerados da bactéria *Gallionella ferruginea* (fig. 3.7e, f). Estes micro-organismos produzem substâncias extracelulares poliméricas na forma de um caule torcido como uma fita, onde o óxido de ferro pode precipitar, conforme relataram Søgaard et al. (2001), Hallberg & Ferris (2004), Zhilei et al. (2010) e Chan et al. (2011).

Os espeleotemas do tipo fibrosos ocorrem apenas em um pequeno conjunto em uma caverna denominada Fenda Sem Fim, desenvolvida na Formação Furnas (fig. 3.7g). Estes espeleotemas são compostos apenas por gipsita, fato inédito para as rochas daquela formação. Foi realizada apenas a análise de difratometria de raios X neste tipo de espeleotema para determinar sua composição química, pois a feição é única e de pequeno porte (fig. 3.7h). Devido à raridade do conjunto, estes exemplares constituem um depósito mineral secundário de alto valor científico para a região dos Campos Gerais do Paraná. Pontes et al. (2017) relataram a ocorrência de espeleotemas semelhantes, baseando-se na comparação da cor e do hábito, apenas no Abrigo Casa de Pedra da Granja, formado em rochas do Grupo Itararé, no município de Tibagi, localizado a 90 quilômetros da área de estudo.

A fonte para o sulfato, no caso do espeleotema de gipsita da Fenda Sem Fim, pode estar relacionada com o guano de morcegos e andorinhões-de-coleira-falha (*Streptoprocne biscutata* – pássaro regional típico). Fungos e bactérias podem promover atividades oxidantes capazes de precipitar sulfato a partir da decomposição de matéria orgânica, conforme apontado por Vidal Romaní et al. (2010) e Aubrecht et al. (2012). A alteração química de feldspatos, presentes como grãos componentes dos arenitos da Formação Furnas (Borghi, 1993), pode ser a fonte de cálcio. Contudo, a ocorrência restrita a apenas um ponto de uma caverna ainda deixa em aberto a gênese deste depósito mineral secundário. Condições microclimáticas específicas (temperatura, umidade e luminosidade) combinadas com

a disponibilidade dos elementos químicos (Ca e S) podem ser fatores fundamentais para a formação desta variedade de espeleotema.

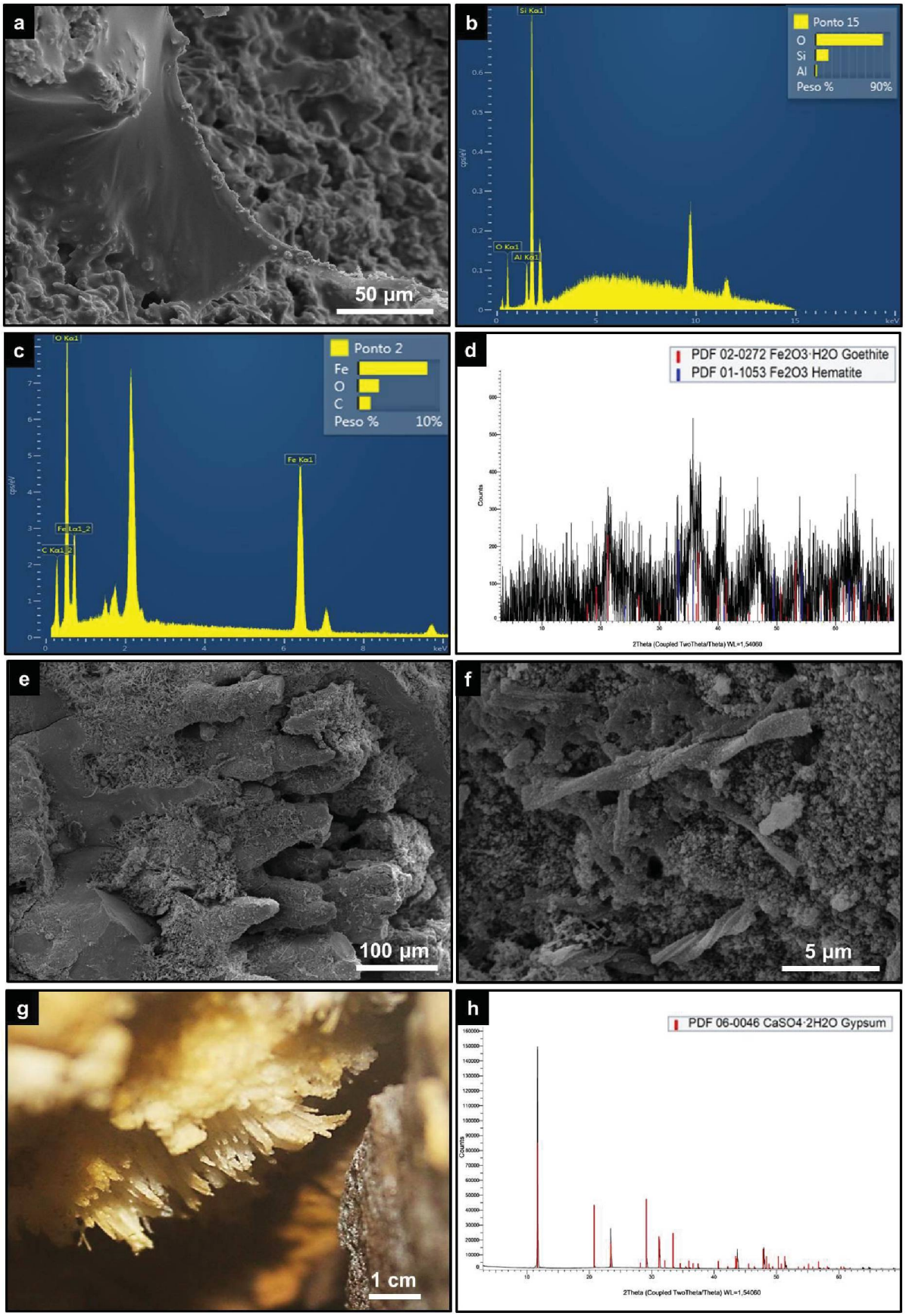


Fig. 3.7. Imagem eletrônica secundária mostrando precipitação de sílica no entorno de uma teia de aranha (a); análise de EDS indicando sílica na composição da precipitação no entorno dos fios de teia de aranha (b); análise EDS indicando óxido de ferro na composição dos espeleotemas estalagmíticos da Caverna do Zé (Formação Furnas) (c) e DRX definindo a composição do mesmo depósito mineral secundário (d), óxido amorfo de ferro associado à hematita e goethita; imagens de MEV de bactérias *Gallionella ferruginea* formando EPS em uma porção de uma estalagmite com aspecto de crescimento dendrítico e, (e) detalhe de substâncias extracelulares poliméricas, produzidas pela referida bactéria, na forma de um caule torcido como uma fita (f); pequeno conjunto de espeleotemas do tipo fibroso, na Fenda Sem Fim (Formação Furnas) (g) e DRX apontando gipsista na composição do referido depósito (h).

Estruturação interna

A porosidade total, obtida pela quantificação visual por microscopia petrográfica, apresenta valores diferenciados para cada tipo de espeleotema, com ocorrência de diferentes valores em uma mesma amostra quando analisados setores internos distintos. As formações do tipo cogumelo são mais porosas em comparação às demais variedades. Por outro lado, os espeleotemas que apresentam microlaminações internas bem definidas (arborescentes, estalactíticos e colunares de crescimento horizontal/ascendente) tendem a apresentar baixa porosidade total.

Um espeleotema colunar com crescimento horizontal, do Sumidouro do Córrego das Fendas, Formação Furnas, mostrou porosidade total de aproximadamente 7%, em análises de micro-CT. Um depósito do tipo arborescente, da Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa (Arenito Vila Velha), apresentou o valor de 3,7% no mesmo tipo de análise. Entretanto, nas porções mais externas dos espeleotemas a porosidade total apresenta tendência de ser maior, mostrando valor de 27,4% no espeleotema da Formação Furnas e 7% no exemplar desenvolvido no Arenito Vila Velha. Esta característica também foi identificada durante as análises com microscopia de luz transmitida (fig. 3.8a, b).

A baixa porosidade nas porções mais internas pode ser resultado do tempo de sua formação. Setores mais antigos e mais internos tendem a ser menos porosos e apresentarem microlaminação melhor definida do que nos setores externos. A decomposição de matérias orgânicas, substituição mineral e compactação são fatores relacionados à baixa porosidade. Em alguns casos, esta característica também é resultada da ação de micro-organismos, envolvendo precipitações recentes no interior dos espeleotemas, devido à colonização biológica atual por diatomáceas, cianobactérias e outros micro-organismos capazes de precipitar sílica.

Fernandéz Verdía et al. (2000), estudando espeleotemas silicosos desenvolvidos em rochas ricas em sílica (quartzitos, arenitos, granitos), identificaram precipitação de sílica causada por ação microbial em poros destes depósitos minerais secundários, criando porções compactas, sem espaços vazios. Os autores também atribuíram estruturas rítmicas de acreção em camadas concêntricas relacionadas a processos biogênicos. Feições semelhantes foram identificadas em várias amostras do presente estudo, provenientes de cavidades desenvolvidas em rochas de ambas as unidades geológicas, consideradas então como uma evidência de organomineralização ou mineralização biologicamente induzida (fig. 3.8c, d, e, f).

Em três tipos de espeleotemas – arborescentes, estalactíticos e colunares com crescimento horizontal/ascendente – foram identificadas três microfácies por microscopia óptica de luz transmitida. As observações foram feitas em corte transversal às microlaminações mais antigas, das porções interiores, e mais novas, das porções externas dos espeleotemas. Foram assim identificadas microfácies denominadas de interior, intermediária e exterior (fig. 3.9a).

A microfácies interior apresenta microlaminações bem definidas, com lâminas sobrepostas (indicando o sentido de crescimento do espeleotema) (fig. 3.9b). A estrutura varia entre as cores marrom e branca, com espessura similar entre cada lâmina. Nesta porção ocorrem principalmente grãos de quartzo e moscovita, orientados concordantemente com a laminação. Estes grãos minerais podem se aderir às irregularidades da superfície do espeleotema, mas também é possível a captura por biofilme durante a formação do depósito.

A microfácies intermediária possui laminação incipiente, que varia entre as cores marrom escura e branca, com espessura maior das lâminas se comparada com a microfácies interior (fig. 3.9c). Os poros são mais abundantes e os materiais biológicos, principalmente fragmentos vegetais, mais frequentes.

A microfácies exterior não exibe microlaminação e possui aspecto desorganizado. A cor marrom escura predomina, com porções brancas esparsas (fig. 3.9d). A porosidade e quantidade de materiais de origem biológica, especialmente fragmentos vegetais, é maior comparado com as outras microfácies (fig. 3.9e, f, g, h). Em alguns casos, as porções brancas nesta microfácies apresentam laminação ondulada e em franjas, similar às descritas em estromatólitos desenvolvidos em rochas sedimentares carbonáticas por Iespa et al. (2012).

Em análises petrográficas de seções delgadas de pequena porção com 1,07 centímetros de comprimento de um espeleotema arborescente (coral) identificou-se 78 lâminas, sendo 39 escuras e 39 claras (fig. 3.9i). A lâmina com menor espessura tem 20 µm e a mais espessa apresenta 1,93 milímetros. As lâminas de espessura menor estão na microfácies interior e as mais espessas se concentram na microfácies exterior. A variação alternada de cor entre cada par de lâminas possivelmente está ligada a diferentes fases de formação do espeleotema e pode ser relacionada a períodos com maior ou menor umidade, mostrando potencial para registro climático anual ou sazonal, conforme apontado por Sallstedt et al. (2014), Riechelmann et al. (2016) e Zepeda Mendoza et al. (2016). Esta alternância de cor das laminas pode estar relacionada à diferença na composição mineralógica. Wray (1999), em estudo de espeleotemas silicosos de cavernas australianas, aponta que as lâminas de cores claras são compostas por calcedônia e de cores escuras por calcedônia misturada com opala-A/calcedônia.

Os espeleotemas do tipo estalagmítico apresentaram duas microfácies distintas intercaladas (fig. 3.10a, b). Um dos conjuntos apresenta tênue microlaminação que varia entre cores vermelha e amarela (fig. 3.10c). A outra microfácies, predominante neste tipo de espeleotema, é composta por lâminas bem definidas de cores vermelha a preta, sobrepostas por microestruturas colunares de cores vermelhas a alaranjadas (fig. 3.10d). Estas microestruturas colunares correspondem às porções com alta concentração da bactéria *Gallionella ferruginea*, conforme identificado nas análises por MEV.

Os espeleotemas do tipo cogumelos não apresentam estrutura interna definida. Por se tratar de um material de baixa resistência não foi possível obter seções delgadas. No entanto, é possível observar nas imagens de MEV que se trata de um depósito mais desorganizado, sem microlaminações (fig. 3.10e).

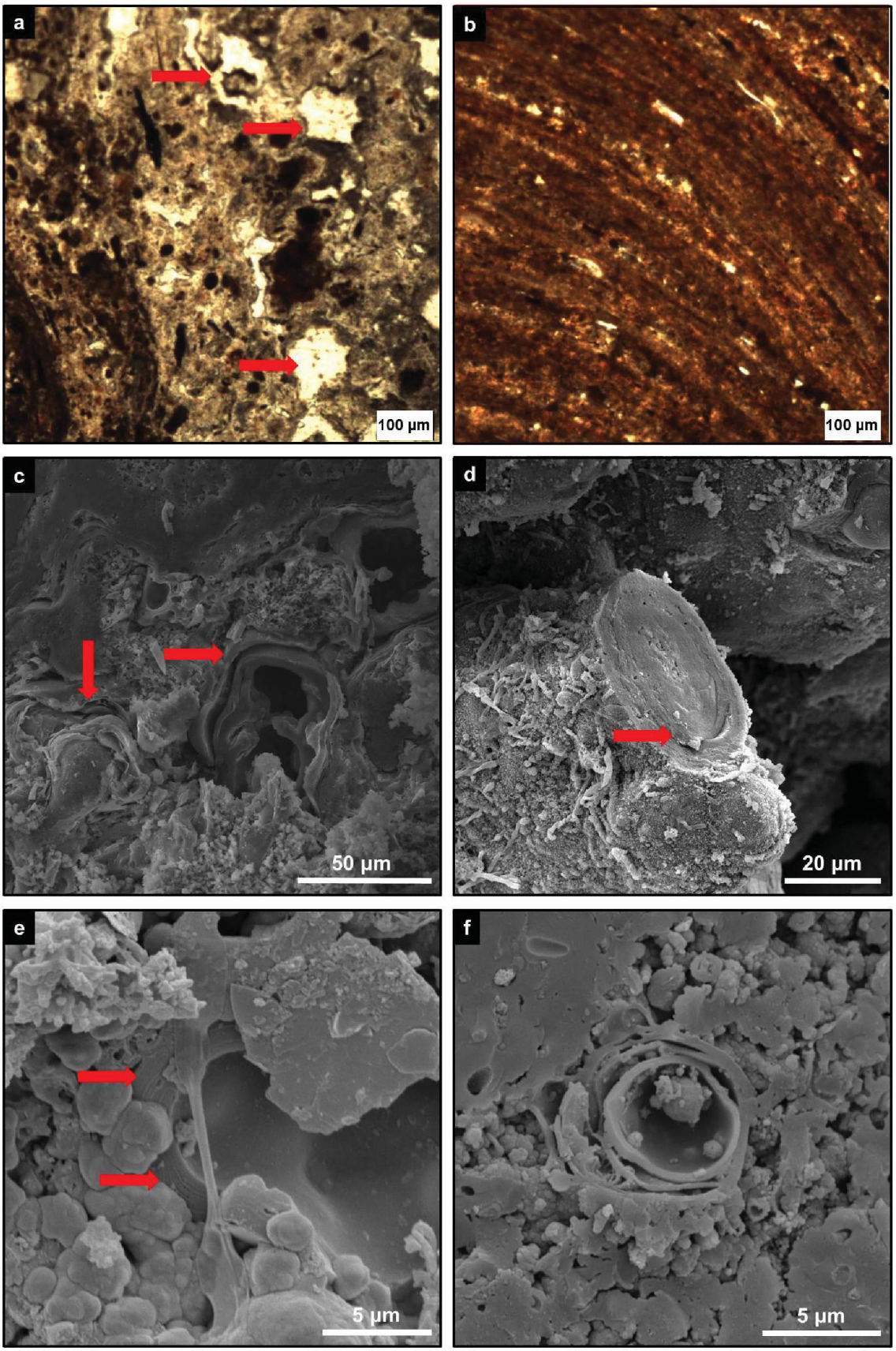


Fig. 3.8. Fotomicrografias de seção petrográfica (com polarizadores paralelos) mostrando alta porosidade em porção externa (microfácies superior) de um espeleotema (poros indicados com as setas vermelhas) (a) e porção interna (microfácies inferior) de menor porosidade (b); imagens eletrônicas secundárias mostrando estruturas rítmicas de acreção concêntrica em camadas (setas vermelhas), evidenciando organomineralização (c, d, e, f).

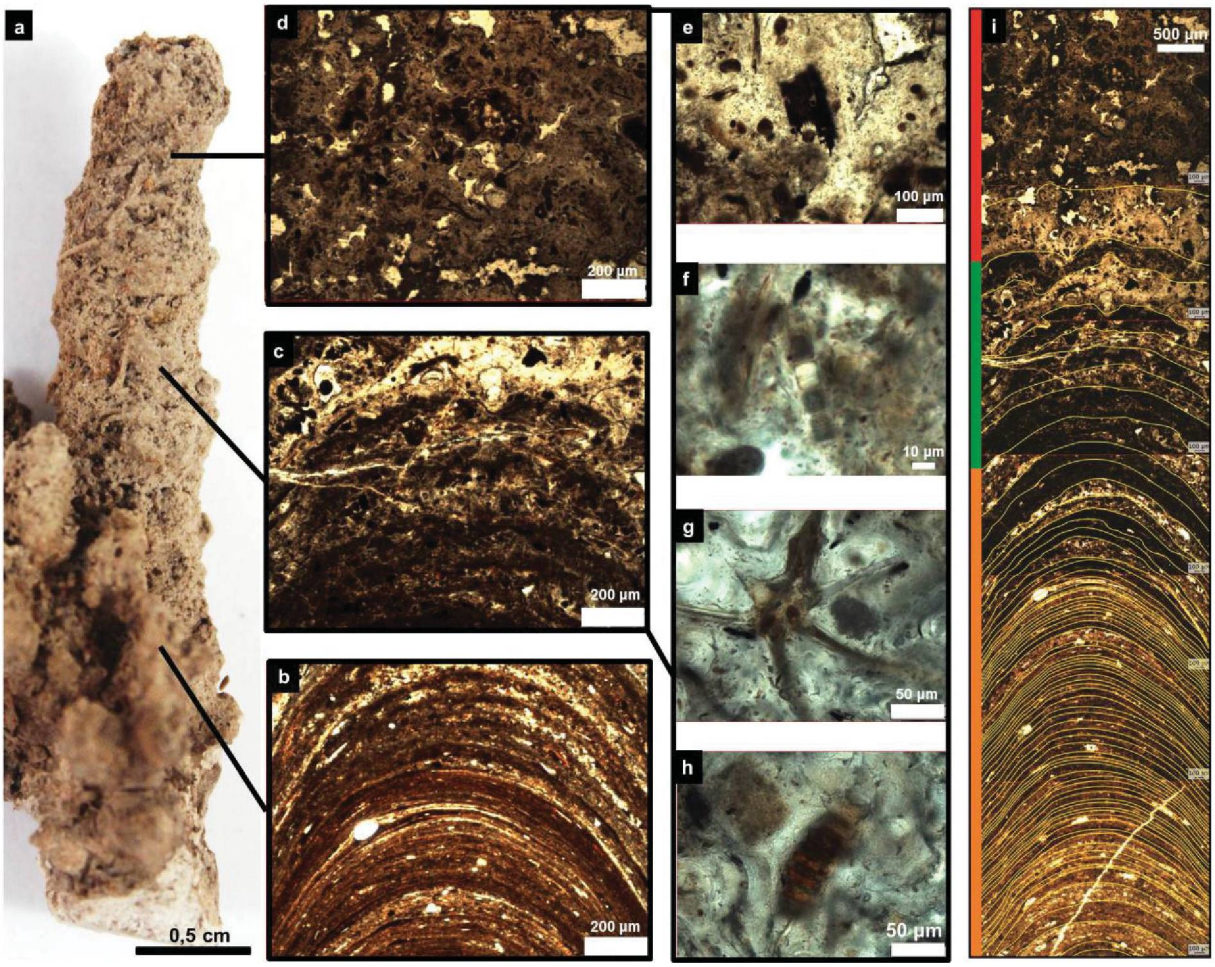


Fig. 3.9. Espeleotema típico (a) e fotomicrografia de seções finas (todas com polarizadores paralelos) mostrando as subdivisões do espeleotema: microfácies interior (b), microfácies intermediária (c) e microfácies exterior (d). Nas porções intermediárias e exteriores ocorrem diversos tipos de elementos biológicos, como: fragmentos vegetais (parte central escura) e esporos de fungos e poléns (esferas de cores presta e marrom) (e); diatomácea *Melosira* sp. (f); *Amoeba radiosa* (g) e micro-organismos não identificados (h). Montagem de imagens petrográficas microscópicas de um espeleotema arborescente (coral) mostrando 78 microlaminações (limitadas por linhas amarelas) (i). As cores laterais representam os limites entre as microfácies, linha vermelha: interior; linha verde: intermediária; linha laranja: exterior.

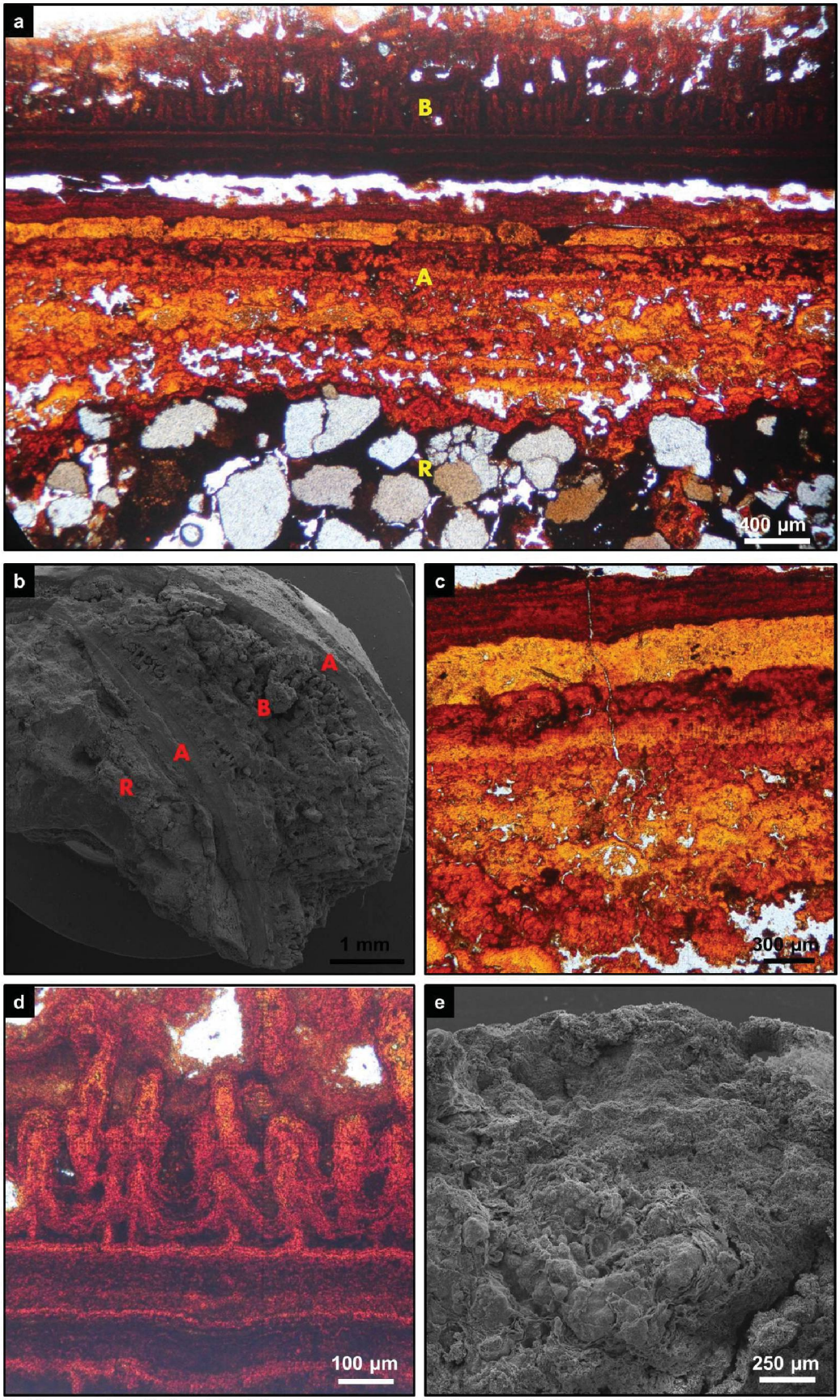


Fig. 3.10. Duas microfácies identificadas nos espeleotemas do tipo estalagmítico (a). B: microfácies com microlaminação bem definida de cores vermelha a preta, sobreposta por feições de microestruturas colunares de cores vermelhas a alaranjadas com alta concentração de bactérias *Gallionella ferruginea*; A: microfácies com tênue microlaminação que variam de cores vermelha e

amarela; R: porção de rocha ou sedimento onde o espeleotema se formou. Alternância das duas microfácies em espeleotema estalagmítico (b). Imagem de MEV, de elétrons secundários. Fotomicrografia de seção delgada mostrando detalhes das microfácies A (c) e B (d). Imagem eletrônica secundária de espeleotema do tipo cogumelo, evidenciando a ausência de estrutura interna, sem microlaminação (e).

Padrão de ocorrência

Com base em seções geológicas e caracterização faciológica das rochas do substrato dos espeleotemas, observou-se que estes se desenvolvem em todas as litofácies areníticas, de granulação fina a grossa, de seleção e grau de cimentação variada. Menos frequentemente e em menor porte, esses depósitos podem ocorrer em camadas síltico-argilosas e estratos conglomeráticos da Formação Furnas.

Os planos de acamamento, estratificações e fraturas exercem nítido controle no desenvolvimento dos espeleotemas. Em alguns casos, feições de intemperismo aparecem associadas aos depósitos minerais neoformados, embora não constitua regra, pois da mesma forma que existem registros de espeleotemas em arenitos friáveis, há também em porções silicificadas por processos diagenéticos.

Conforme mencionado, os espeleotemas se desenvolvem no interior de cavidades subterrâneas e em cavernamentos em afloramentos superficiais, ou seja, além de ambientes de penumbra ou totalmente afóticos também em locais com presença de luz. No entanto, a umidade e a temperatura são fatores que influenciam diretamente na formação destas feições geológicas. Além disso, é importante destacar o papel fundamental dos aerossóis, presentes no interior das cavidades subterrâneas, na formação dos espeleotemas, conforme já apontado por Maltsev (1997), Klimchouck et al. (1997) e Dredge et al. (2013).

Os escorrimentos de rocha

Na Formação Furnas e Arenito Vila Velha é conhecida uma feição denominada escorrimento de rocha ou cascata de rocha (*flowstone*). Algumas descrições realizadas na área de estudo relataram esta feição como um espeleotema (*e.g.* Pontes, 2010; Massuqueto, 2010; Flügel Filho et al., 2012). No entanto, análises petrográficas e de microscopia eletrônica de varredura mostraram que não se tratam de depósitos químicos secundários, mas sim de depósitos clásticos.

Estas feições são formadas por solos e matéria orgânica de superfície que são transportados para o interior das cavernas por águas que infiltram por descontinuidades sedimentares e tectônicas da rocha. O material sedimentar escorre pelas paredes formando acumulações em forma de cascatas, podendo formar crostas superficiais rígidas, principalmente quando a circulação da água cessa.

Os depósitos clásticos assim formados apresentam granulação variada, mas com predomínio das frações silte e argila, que lhes confere certa plasticidade, possibilitando a formação de expressões típicas nestes depósitos devido ao escorrimento constante da água e sua carga sedimentar sobre os sedimentos previamente depositados, seguindo exatamente conforme processo descrito por Vidal Romaní et al. (2014) para escorrimentos de rocha em cavernas graníticas.

Quando o depósito se forma em parede vertical o escorrimento da água apresenta maior velocidade de fluxo. Nestas condições, os depósitos clásticos exibem superfície com aspecto enrugado de formas variadas (côncavas, convexas, em franjas) e, microterraços são moldados. Em situações onde o depósito formou-se em rampas e a velocidade de fluxo hídrico é menor, comumente formam-se pequenas barragens e piscinas (*micro-gours*), pois a água ocasiona uma movimentação lenta e irregular do sedimento.

Mesmo os exemplares estudados não apresentando características de espeleotemas, não são excluídos a possibilidade de ocorrer precipitação mineral nestes depósitos clásticos, merecendo maior detalhamento das porções superficiais de alguns escorrimentos, quando na existência de crostas rígidas. Cabe destacar que estas feições também apresentam alta capacidade de capturar materiais de origem biológica, possibilitando registros paleoambientais e paleoecológicos.

Conclusões

Os espeleotemas formados nos quartzoarenitos da Formação Furnas e subunidade Vila Velha apresentam seis formas: 1) arborescentes ou corais, 2) cogumelos, 3) estalactíticos, 4) estalagmíticos, 5) colunares com crescimento horizontal/ascendente e 6) fibrosos.

Em vários espeleotemas foram identificadas bioassinaturas, cianobactérias, bactéria *Gallionella ferruginea*, diatomáceas e outros micro-organismos capazes de

precipitar minerais, como sílica, caulinita e óxidos de ferro. Registros de ação microbial estão presentes em quase todas as amostras estudadas e sugerem influência biológica na gênese dos espeleotemas. Portanto, estes depósitos minerais secundários podem ser classificados como microbialitos, pois sua gênese envolveu organomineralização ou mineralização biologicamente induzida.

Os espeleotemas arborescentes ou corais, estalactíticos, estalagmíticos e colunares com crescimento horizontal/ascendente apresentam, em suas fases genéticas, tanto ação microbiológica, como processos químicos inorgânicos. Os espeleotemas do tipo cogumelos são os que podem ser classificados como microbialitos com mais razão, pois a ação microbial prevaleceu em sua gênese. Os depósitos do tipo fibrosos apresentam possibilidade de serem minerais resultados de processos metabólicos de micro-organismos. No entanto, a raridade de ocorrência deste tipo de espeleotema, encontrado em apenas um local e com volume muito pequeno, inviabilizou a realização de análises adicionais. Futuras investigações devem ser feitas a partir de novas ocorrências deste tipo.

Não há um padrão quanto ao modo de ocorrência dos espeleotemas relacionado com características estratigráficas ou sedimentares específicas dos quartzoarenitos na área de estudo. Contudo, os espeleotemas tendem a se desenvolver em locais onde há controle por planos de estratificações e fraturas. Estas descontinuidades favorecem a circulação da água no interior do maciço rochoso, contribuindo para o intemperismo químico inicial, para a liberação e remoção de íons e moléculas da superfície de minerais, ciclo fundamental para a disponibilização de matéria-prima para o desenvolvimento de depósitos químicos secundários.

Estes espeleotemas, resultados da dissolução dos grãos de quartzo e do cimento caulinítico, são uma indicação marcante de processo cárstico nos quartzoarenitos da Formação Furnas e na subunidade Vila Velha. A ação microbiológica identificada na formação dos espeleotemas também pode estar presente no intemperismo químico dos componentes minerais das unidades geológicas estudadas. O registro de grãos de quartzo corroídos em rochas alteradas sugere a contribuição desses micro-organismos, principalmente na modificação do pH, tornando a água alcalina e gerando um ambiente ideal para o intemperismo químico do quartzo.

Por conter centenas de cavidades naturais subterrâneas e um conjunto expressivo de feições geológicas de origem cárstica, classifica-se a área de afloramento destas unidades geológicas como uma província espeleológica e uma nova região cárstica brasileira, denominada Campos Gerais do Paraná.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Daniel Atencio, do Laboratório de Difratometria de Raios X (Universidade de Paulo – USP), Laboratório de Estudos de Petrologia Sedimentar (LabESed), Laboratório de Minerais e Rochas (Lamir) e Centro de Microscopia Eletrônica (CME/Universidade Federal do Paraná – UFPR), Laboratório de Geologia Pesquisa e Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-labmu/Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG). O primeiro autor agradece à Fundação Grupo Boticário pelo suporte financeiro ao projeto científico n° A0016_2015 cordenado por este pesqusiador, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado e ao Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), por todo suporte durante esta pesquisa.

Referências

Aubrecht R., Barrio-Amorós C.L., Breure A.S.H., Brewer-Carías C., Derka T., Fuentes-Ramos O.A., Gregor M., Kodada J., Kováčik Ľ., Lánczos T., Lee N.M., Liščák P., Schlögl J., Šmída B. & Vlček L. 2012 - Venezuelan tepuis: their caves and biota. Acta Geologica Slovaca – Monograph, Comenius University, Bratislava, 168 p.

Aubrecht R., Brewer-Caría, C.H., Šmída B., Audy M., Kováčik L', 2008 - Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela. Sedimentary Geology, **203**: 181-195. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.10.005

Araújo T.P., 2016 - Sistema fluvial ou dominado por maré?: estudos de processo de sedimentação e arquitetura deposicional no Canyon do Guartelá, Formação Furnas, Devoniano Inferior, Bacia do Paraná, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 61 p.

Assine M.L., Soares P.C., Milani E.J., 1994 - Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, **24 (2)**: 77-89.

Assine M.L., 1996 - Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, São Paulo, 207 p.

Assine M.L., 1999 - Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas, no flanco sudeste da bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, **29**: 357-370.

Baskar S., Baskar R., Kaushik A., 2007 - Evidences for microbial involvement in the genesis of speleothem carbonates, Borra Caves, Visakhapatnam, India. Current Science, **92(3)**: 350-355.

Bennett P.C., 1991 - Quartz dissolution in an organic-rich aqueous system. Geochimica et Cosmochimica Acta, **55**: 1781-1797. https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90023-X

Bergamaschi S., 1992 - Análise Sedimentológica da Formação Furnas na Faixa de Afloramentos do Flanco Norte do Arco Estrutural de Ponta Grossa, Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, IG-UFRJ, Rio de Janeiro. 172 p.

Borghi L., 1993 - Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas (Prídoli Devoniano inferior) em afloramentos do bordo leste da bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 227 p.

Brehm U., Gorbushina A.A., Mottershead D., 2005 - The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **219**: 117–129. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.10.017

Budny J.M., 2004 - Algunas cuevas en areniscas en Paraná, Brasil. Boletín Informativo de la Comisión de Geospeleología, Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe (FEALC). **45(1)**: 2-7.

Cañaveras J.C., Sánchez-Moral S., Soler V., Saiz-Jiménez C., 2001 - Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. Geomicrobiology Journal, **18**: 223-240. http://dx.doi.org/10.1080/01490450152467769

Canuto J.R., Rocha-Campos A.C., Sato P.E.S., 1997 - The Late Paleozoic Lapa Sandstone (Itarare Subgroup): a possible tunnel-valley fill?. Anais da Academia Brasileira de Ciências, **69(2)**: 275-276.

Chan C.S., Fakra S.C., Emerson D., Fleming E.J., Edwards K.J., 2011 - Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: implications for biosignature formation. The ISME Journal, **5**: 717–727. https://dx.doi.org/10.1038%2Fismej.2010.173

Cruz G. C. F. da., 2007 - Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. In.: Melo M. S. de, Moro R. S., Guimarães G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. Editora UEPG, 230 p.

Dredge J., Fairchild I. J., Harrison R. M., Fernandez-Cortes A., Sanchez-Moral S., Jurado V., Gunn J., Smith A., Spötl C., Mattey M., Wynn P.M., Grassineau N. & Wynn P. M., 2013. Cave aerosols: distribution and contribution to speleothem geochemistry. Quaternary Science Reviews, **63**, 23-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.016

Dubois C., Quinif Y., Baele J-M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Dandurand G., Havron C., Kaufmann O., Lans B., Maire R., Martin J., Rodet J., Rowberry M.D., Tognini P., Vergari A., 2014 - The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. Earth-Science Reviews, **131**: 116-148. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.006

Ehrlich H.L., 1996 - Geomicrobiology. 3rd edition. Marcel Dekker, Inc., New York, 719 p.

Fernández Verdía M.Á., Sanjurjo Sánchez J., Vidal Romaní J.R., 2000 - Génesis de espeleotemas de ópalo-a en sistemas cársticos desarrollados en rocas ácidas. Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, **25**: 353-356.

Finlayson B.L., Webb J.A., 1985 - Amorphous speleothems. Cave Science, **12(12)**: 3-8.

Flügel Filho J.C., Guimarães G.B., Pontes H.S., Massuqueto L.L., Melo M.S., 2012 - Geodiversidade dos Campos Gerais do Paraná: morfologia de espeleotemas de cavidades em arenitos da Formação Furnas. In: anais do 46º Congresso Brasileiro de Geologia. Santos-SP. Sociedade Brasileira de Geologia.

Flügel Filho J.C., 2012 - Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa (PR): geodiversidade cárstica de um sistema subterrâneo e seus valores. Monografia Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

França A.B. & Potter P.E., 1988 - Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte I). Boletim de Geociências da PETROBRÁS, **2**: 147-191.

França A.B., Winter W.R., Assine M.L., 1996 - Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canallobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, **26(1)**: 43-56.

Hallberg R. & Ferris F.G., 2004 - Biomineralization by Gallionella. Geomicrobiology Journal, **21(5)**: 325-330. https://doi.org/10.1080/01490450490454001

Hardt R., 2011 - Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 224 p.

Hill C. A., Forti P., 1997 - Cave Minerals of the World. National Speleological Society, Huntsville, Alabama.

Iespa A.A.C., Iespa C.M.D., Borghi L., 2012 - Evolução paleoambiental da Lagoa Salgada utilizando microbialitos, com ênfase em microfácies carbonáticas. Geociências (São Paulo), **31(3)**: 371-380.

Klimchouck A. B., Nasedkin V. M., & Cunningham K. I., 1997. Speleothems of aerosol origin: reply. Journal of Caves and Karst Studies, **59**, 45-47.

Letenski R., Guimarães G. B., Piekarz G. F., Melo M. S., 2009 - Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução. Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas. **2(1)**: 5-15.

Lestenski R., Melo M.S., Guimarães G.B., Piekarz G.F., 2011 - Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução. In: Carpanezzi, O.T.B. & CAMPOS, J.B. (Eds.), *Coletânea de pesquisas: Parque Estaduais de Vila Velha, Cerrado e Guartelá*, 239-248.

Lobato G. & Borghi L., 2005 - Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em afloramentos da borda leste da Bacia do Paraná. In: Anais do Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, Salvador, 1-6.

Lundberg J., Brewer-Carias C., Mcfarlane D., 2010 - Preliminary results from U–Th dating of glacial–interglacial deposition cycles in a silica speleothem from Venezuela. Quaternary Research, **74(1)**: 113-120. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.03.005

Maack R., 1946 - Geologia e geografia da região de Vila Velha e considerações sobre a glaciação carbonífera do Brasil. Curitiba, Arquivos do Museu Paranaense, 305 p.

Maltsev V. A., 1997. Speleothems of Aerosol Origin: Discussion. Journal of Caves and Karst Studies, **59**, 43-44.

Massuqueto L.L., 2010 - O sistema cárstico do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa - PR): caracterização da geodiversidade e de seus valores. Monografia, Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 81 p.

Melo M.S. & Coimbra A.M., 1996 - Ruiniform relief in sandstones – the example of Vila Velha, Carboniferous of the Paraná Basin, Southern Brazil. Barcelona, Acta Geológica Hispanica, **31(4)**: 25-40.

Melo M.S., 2006 - Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha. Ponta Grossa: Editora UEPG, 145 p.

Melo M.S., Bosetti E.P., Godoy L.C., Pilatti F., 2007 - Vila Velha, PR: Impressionante relevo ruiniforme**.** In.: Schobbenhaus C., Campos D.A., Queiroz E.T., Winge M., Berbert-Born, M., *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. 269-277.

Melo M.S. & Giannini P.C.F., 2007 - Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. Earth Surface Processes and Landforms, **32**: 2149-2164. https://doi.org/10.1002/esp.1520

Melo M.S., 2010 - Processos erosivos superficiais e subterrâneos em arenitos da Formação Furnas na região dos Campos Gerais do Paraná. Relatório Resumido. CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 20 p.

Melo M.S., Guimarães G.B., Pontes H.S., Massuqueto L.L., Pigurim I., Bagatim H.Q., Giannini P.C.F., 2011 - Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. SBE – Campinas, SP. Espeleo-Tema. **22(1)** 81-97.

Melo M.S., Guimarães G.B., Chinelatto A.L., Giannini P.C., Pontes H.S., Chinelatto A.C.A., Atencio D., 2015 - Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences, **63**: 20-35. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.06.011

Milani É.J., França A.B., Schneider R.L., 1994 - Bacia do Paraná. Boletim de Geociências PETROBRÁS, **8**: 69-82.

Milani E.J., Melo J.H.G., Souza P.A., Fernandes L.A.E, França A.B., 2007 - Bacia do Paraná. IN: Cartas Estratigráficas - Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, **15(2)**, p. 265-287.

Miller A.Z., Pereira M.F.C., Calaforra J.M., Forti P., Dionísio A., Saiz-Jimenez C., 2014 - Siliceous Speleothems and Associated Microbe-Mineral Interactions from Ana Heva Lava Tube in Easter Island (Chile). Geomicrobiology Journal. **31(3)**: 236–245. https://doi.org/10.1080/01490451.2013.827762

Miot J., Benzerara K., Kappler A., 2014 - Investigating Microbe-Mineral interactions: Recent Advances in X-Ray and Electron Microscopy and Redox-Sensitive Methods. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. **42**: 271–89. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124110

Pavan B.H., 2015 - Sistemas fluviais de grandes dimensões: uma reinterpretação da Formação Furnas no Cânion Guartelá-PR. Monografia, Geologia na Universidade Estadual de Campinas, 45 p.

Pontes H.S., Rocha H.L., Massuqueto L.L., Melo M.S., Lopes M.C., Guimarães G.B., 2008 - Mudanças recentes na circulação subterrânea do Rio Quebra-Pedra (furna do Buraco do Padre, Ponta Grossa, PR). In: anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia.

Pontes H.S., 2010 - Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, Paraná. Exemplo de Relevo Cárstico na Formação Furnas. Monografia (Graduação em Bacharelado em Geografia) – Setor de Ciências Exatas e Naturais - UEPG. 92 p.

Pontes H.S., Massuqueto L.L., Budny, J.M, 2012 - Gruta Cambiju: importante geossítio nos arenitos da Formação Furnas, Município de Ponta Grossa, Campos Gerais do Paraná. In: Anais do 46º Congresso Brasileiro de Geologia.

Pontes H.S., 2014 - Espacialização de feições cársticas da Formação Furnas: ferramenta para gestão do território no Município de Ponta Grossa (PR). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 163 p.

Pontes H.S., Massuqueto L.L., Guimarães G.B., Mochiutti N.F.B., 2017 - Patrimônio espeleológico do município de Tibagi, Campos Gerais do Paraná. In: Rasteiro M.A.,

Teixeira-Silva C.M., Lacerda S.G. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 34. Ouro Preto. Anais... Campinas: SBE, 417-426.

Pontes H.S., Massuqueto L.L., Foltran A.C., Pontes F.S., Guimarães G.B., Mochiutti N.F.B., Guimarães S.K., Burgardt S., do Vale T.F., Feitosa N.M.N., 2018a - Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais: Ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas - GUPE - Ponta Grossa. 61 p.

Pontes H.S., Massuqueto L.L., Fernandes L.A., Foltran A.C., Melo M.S., Moreira J.C., 2018b - Caves geodiversity evaluation as an instrument to the management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil. Geoheritage, **10(1)**:1-11. https://doi.org/10.1007/s12371-018-0317-9

Riechelmann D.F.C., Fohlmeister J., Tjallingii R., Jochum K.P., Richter D.K., Brummer G.J.A., Scholz D., 2016 - Detection and origin of different types of annual laminae in recent stalagmites from Zoolithencave, southern Germany: Evaluation of the potential for quantitative reconstruction of past precipitation variability. Climate of the Past Discussion, 1-42. https://doi.org/10.5194/cp-2016-18

Romaní J.R.V. & Rodriguez M.V., 2007 - Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution. Nature Conservation, **63**: 41-46.

Sallstedt T., Ivarsson M., Lundberg J., Sjöberg R., Romaní J.R.V., 2014 - Speleothem and biofilm formation in a granite/dolerite cave, Northern Sweden. International Journal of Speleology, **43**: 305-313. http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.7

Schneider R.L., Muhlmann H., Tommasi E., Medeiros R.A., Daemon R.F., Nogueira A.A., 1974 - Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28. Porto Alegre, Anais... Porto Alegre, **I**: 41-65.

Søgaard E.G., Aruna R., Abraham-Peskir J., Koch C. B., 2001 - Conditions for biological precipitation of iron by *Gallionella ferruginea* in a slightly polluted ground water. Applied Geochemistry, **16(9-10)**: 1129-1137. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00014-2

Spinardi R.D., Lopes M.C., 1990 - Levantamento espeleológico da caverna das Andorinhas – PR 052. In: Anais do IV Seminário de Pesquisa. Guarapuava. UNICENTRO: 39-40.

Vesely F.F., 2011 - Sulcos de origem glacial em arenitos neocarboníferos do Parque Estadual de Vila Velha, sudeste do Paraná. Geociências, **30**: 589-599.

Vidal Romaní J.R., Sanjurjo Sánchez J., Vaqueiro M. & Fernández Mosquera D., 2010 - Speleothems of granite caves. Comunicações Geológicas, **97**: 71-80.

Vidal Romaní J.R., Vaqueiro Rodríguez M., Sanjurjo Sánchez J., González López L. 2014 - Morphologic types of speleothems in magmatic rock caves. In: Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 490-493.

Webb J. A., Finlayson B. L., 1984 - Allophane and opal speleothems from granite caves in south-east Queensland. Australian Journal of Earth Science. **31**: 341–349.

Wray R. A. L., 1999 - Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia. Australian Journal of Earth Sciences, **46(4)**: 623–632. https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.1999.00732.x

Zalán P.V., Wolff S., Conceição J.C.D.J., Vieira I.S., Astolfi M.A.M., 1987 - A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, **17(3)**: 242-252.

Zalán P.V., Wolff S., Conceição J.C.J., Marques A., Astolfi M.A.M., Vieira I.S., Appi V.T., Zanotto O.A., 1990 - Bacia do Paraná. In: Gabaglia G.P.R. & Milani E.J. (Eds.), *Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. 2. ed. Rio de Janeiro: Gávea. Cap. Bacia do Paraná. p. 135- 168.

Zepeda Mendoza M.L., Lundberg J., Ivarsson M., Campos P., Nylander J.A.A., Sallstedt T., Dalen L., 2016 - Metagenomic Analysis from the Interior of a Speleothem in Tjuv-Ante's Cave, Northern Sweden. PLoS ONE, **11(3)**: 1-23. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151577

Zhilei S., Jun L., Zhixue S., Wei H., Ruyong C., Jiwei L., 2010 - Formation Mechanism of Biogenic Fe-Si Oxide Deposits in Seafloor Hydrothermal Systems. Advances in Earth Science, **25(12)**: 1325-1336.

2.3 CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE FEIÇÕES CÁRSTICAS DA FORMAÇÃO FURNAS E ARENITO VILA VELHA NO MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA (PARANÁ, BRASIL)

Henrique Simão Pontes, Luiz Alberto Fernandes, Gilson Burigo Guimarães, Mário Sérgio de Melo, Laís Luana Massuqueto

Resumo

As rochas da Formação Furnas (Siluriano/Devoniano) e Arenito Vila Velha (Carbonífero Superior), situadas na borda leste da Bacia do Paraná, formam típico relevo cárstico não carbonático. Em seus domínios ocorrem feições que podem ser consideradas chave para a classificação da paisagem como cárstica, incluindo cavernas, depressões no terreno, espeleogens (canais de parede e teto, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos - *tafoni*), rocha arenizada e/ou fantomizada e espeleotemas (depósitos químicos secundários no interior de cavidades subterrâneas). Apresenta-se aqui resultados de pesquisa de caracterização de feições de origem cárstica desenvolvidas nestas rochas, no município de Ponta Grossa, sul do Brasil, mediante análise da relação do seu desenvolvimento, com características litofaciológicas. Seis atributos foram averiguados: 1) composição mineralógica e parâmetros texturais dos componentes, granulação e seleção; 2) porosidade; 3) estruturas sedimentares; 4) estruturas tectônicas; 5) feições de intemperismo (rocha alterada *in situ*) e; 6) padrão de ocorrência. A presença de rochas arenizadas e fantomizadas e de feições de dissolução dos cimentos (caulinítico e de óxidos de ferro), do crescimento sintaxial de quartzo e do arcabouço quartzoso são evidências da carstificação por arenização e fantomização nestes arenitos. As cavidades naturais subterrâneas e depressões no terreno se desenvolvem em áreas com marcante controle estrutural (tectônico e sedimentar). Nas rochas da Formação Furnas, as cavernas se concentram no intervalo estratigráfico médio, conjunto de camadas que inclui principalmente arenitos médios a grossos com intercalações de estratos síltico-argilosos. As demais feições cársticas são desenvolvidas sobretudo em arenitos médios. Novamente, as estruturas sedimentares e tectônicas têm um papel primordial no controle de sua ocorrência e desenvolvimento. A identificação de feições de corrosão na superfície de sobrecrescimento sintaxial de grãos de quartzo em rochas alteradas sugerem a ação de micro-organismos, principalmente na modificação do pH, tornando a água

alcalina, criando ambiente favorável à dissolução de quartzo. A caulinita e o óxido de ferro, os principais cimentos encontrados nos arenitos, podem ser dissolvidos pelo ácido oxálico ($H_2C_2O_4$), como também por atividades microbiológicas. Os resultados da pesquisa ora relatados propõe classificar o relevo desenvolvido nas rochas da Formação Furnas e no Arenito de Vila Velha como cárstico, reforçando a importância destas áreas serem consideradas uma nova região cárstica não carbonática brasileira.

Palavras-chave: arenização, fantomização, intemperismo químico, carstificação, relevo não carbonático.

Introdução

O conceito de carste passou por importantes transformações nas últimas décadas. Algumas áreas que anteriormente eram classificadas como pseudocarste, agora são consideradas como cársticas. Assim, o termo carste não está mais vinculado a um tipo de rocha específica, mas ao conjunto de processos genéticos. Neste contexto, o intemperismo químico, incluindo as diferentes formas de ação química da água sobre as rochas, tem papel fundamental na gênese das feições cársticas. Segundo os conceitos atuais, terrenos constituídos por rochas siliciclásticas não carbonáticas, tais como quartzoarenitos e seus correspondentes metamórficos, meta-arenitos e quartzitos, podem desenvolver relevo e feições cársticas.

Para compreender os processos de carstificação em um litotipo específico é necessário identificar, compreender mecanismos de formação, sua evolução, que são registradas como feições de dissolução e precipitação de origem cárstica, em diversas escalas. Sua análise integrada fornece os indícios que permitem determinar a carstogênese e a espeleogênese de um relevo específico. Os modelos carstogenéticos são propostos através da análise do conjunto, que incluí cavernas, depressões no terreno (dolinas), espeleotemas e espeleogens que se desenvolveram a intervenção de processos de intemperismo químico.

Entretanto, apenas a ocorrência de uma dessas feições, ou de formas isoladas, não deve ser considerada como suficientes para classificar um relevo como cárstico. Algumas rochas podem apresentar processos pontuais de

carstificação, mas não necessariamente constituem relevos cársticos, como por exemplo, envolvendo granitos. Por isso, é indispensável identificar e analisar o conjunto de feições geológicas desenvolvidas em uma determinada área. Este é o primeiro passo para reconhecer e entender um relevo cárstico e os processos de carstificação nele atuantes.

As feições geológicas de origem cárstica são elementos naturais impressos no substrato rochoso, que registram processos a que a rocha foi submetida. Diversas informações podem ser obtidas: qual o processo de evolução, se houve ação de águas subterrâneas, se a zona freática esteve confinada ou não, como o intemperismo químico atuou durante sua gênese. Esta última informação, como apontado anteriormente, é fundamental para classificar um relevo como cárstico ou não. Contudo, estas feições geralmente estão descaracterizadas devido à evolução dos processos no ambiente em que se formaram, envolvendo processos intempéricos recentes, colapsos de blocos rochosos, revestimento por depósitos minerais e outras variáveis que podem ocultar, modificar ou destruir os registros. Deste modo, reconstruir a história evolutiva de um relevo cárstico pode ser um grande desafio.

Atualmente, a morfogênese da paisagem cárstica tem sido interpretada por várias frentes de análise, incluindo dois modelos antagônicos: a carstificação por remoção total e a teoria do primocarste. O primeiro modelo baseia-se nas concepções clássicas sobre carstificação, quando ocorre a remoção total da rocha que passou por intemperismo químico, com ausência total ou pouca geração de resíduos detríticos (material não solúvel), conforme conceituado por Dubois et al. (2014) e Wray e Sauro (2017). Por outro lado, no modelo do primocarste, a rocha é modificada, na etapa inicial, em ambiente de baixa energia, onde o intemperismo químico age inicialmente, seguido pelo intemperismo físico (ruptura mecânica, desagregação, remoção e transporte) por processos hidrológicos de maior energia (Rodet, 1996; Rodet, 2014). Estes modelos têm sido utilizados para compreender a carstificação desenvolvida em diferentes rochas, com ou sem componentes carbonáticos.

No modelo do primocarste, dois processos de carstificação são considerados, a arenização e a fantomização. Ambos têm como essência a alteração química da rocha em ambiente subterrâneo com baixa energia, geração de um produto de alteração (rocha arenizada ou rocha fantomizada) e posterior

remoção mecânica deste material alterado e consequente abertura de dutos, galerias e cavernas. A carstificação por arenização em arenitos com ausência de minerais carbonáticos em sua composição foi identificada em diversas áreas do globo (*e.g.* Martini, 1979; 1982; Jennings, 1983; Galán et al., 2004; Melo e Giannini, 2007), da mesma forma a carstificação por fantomização também é presente (*e.g.* Hardt, Rodet e Pinto, 2010; Hardt, 2011; Quinif e Bruxelles, 2011; Pontes, 2014, Rodet, 2014; e Suchý et al., 2017). A diferença entre estes dois modelos carstogenéticos é que na arenização ocorre intemperismo químico de constituintes exclusivamente silicosos, enquanto na fantomização há ataque químico a componentes mais solúveis da rocha. Porém, rochas compostas por sílica e outros materiais de maior solubilidade podem ter sido submetidas por ambos os processos.

Quartzoarenitos com cimento não carbonáticos da borda leste da Bacia do Paraná (Sul do Brasil) apresentam evidências claras de processos de carstificação, envolvendo a dissolução de cimento e grãos de quartzo (*e.g.* Melo e Giannini, 2007). Nestas rochas foram identificadas feições-chave para a classificação da paisagem como cárstica, pois a gênese destas formas envolveu processos de intemperismo químico em rochas siliciclásticas. Este conjunto inclui cavernas, depressões no terreno, espeleotemas, espeleogens, como canais de teto e parede, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos (*tafoni*) e rochas arenizadas e/ou fantomizadas. Esta última feição permite atestar a existência do primocarste e avançar na interpretação dos processos genéticos atuantes no carste estudado.

O objetivo desta comunicação é caracterizar as feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas em quartzoarenitos com cimento não carbonáticos da área de estudo. A relação do desenvolvimento destas feições com o contexto faciológico e a existência de carstificação por arenização e fantomização são debatidas, a fim de definir a gênese do carste da área de estudo e identificar os mecanismos para a dissolução dos constituintes minerais destas rochas.

Área de estudo

Localização

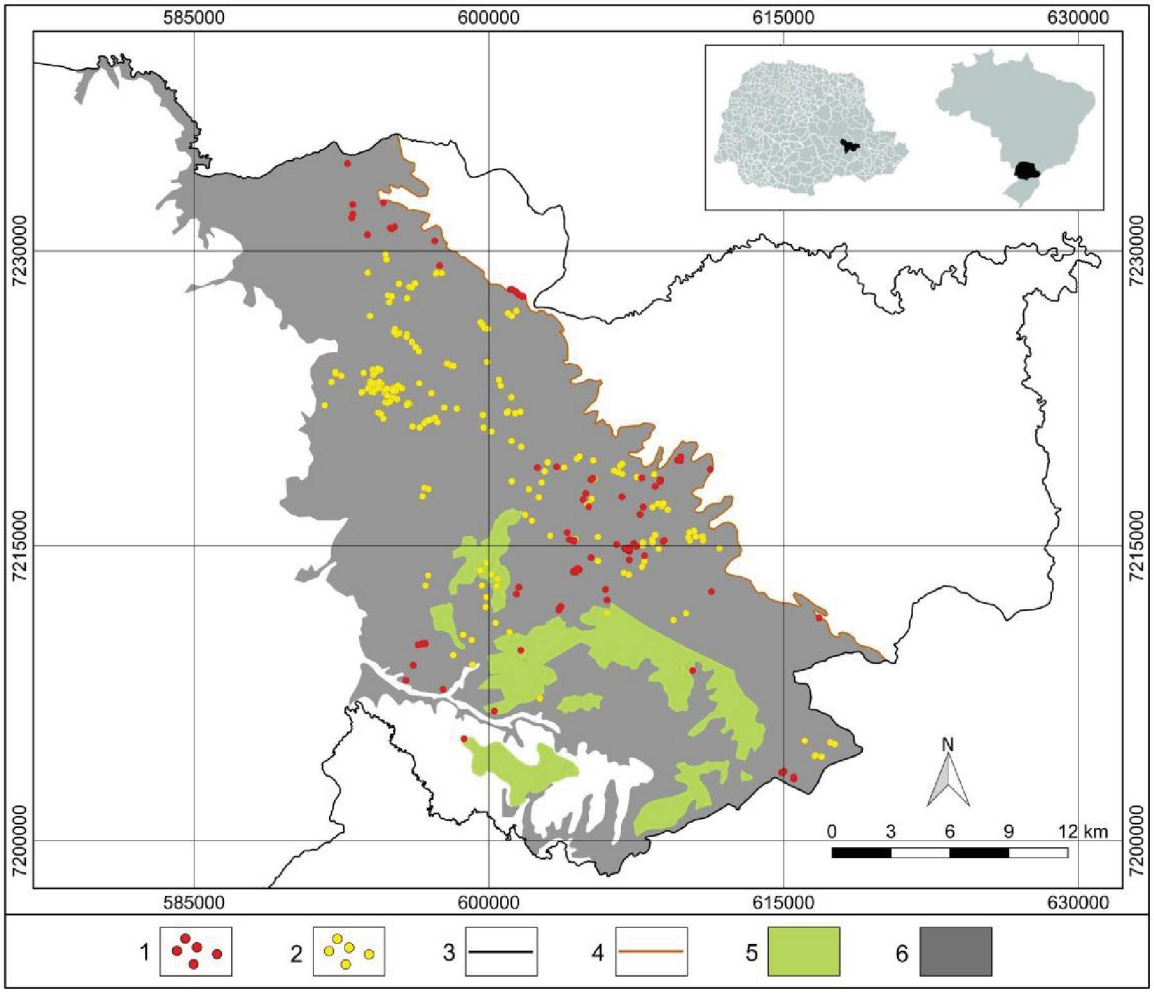
O município de Ponta Grossa está localizado na região dos Campos Gerais, estado do Paraná, Sul do Brasil. O limite territorial da pesquisa foi definido a partir

das áreas com afloramentos de duas unidades geológicas compostas essencialmente por quartzoarenitos, a Formação Furnas (Grupo Paraná) e a subunidade Vila Velha, pertencente à Formação Campo Mourão (Grupo Itararé), na borda leste da Bacia do Paraná (figura 4.1). A primeira unidade ocupa aproximadamente 85% do total do recorte territorial estudado, e a segunda 15%, sendo que a área investigada representa cerca de 30% do município de Ponta Grossa.

Aspectos climáticos

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da área é caracterizado como subtropical do tipo Cfb, que corresponde a clima temperado com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18ºC e temperatura média no mês mais quente abaixo de 22ºC. Os verões são frescos, sem estação seca definida, chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com precipitação média anual entre 1400 e 1800 mm e valores médios de umidade relativa do ar entre 75 e 80%. (Cruz, 2007). Contudo, a área de estudo tem a Escarpa Devoniana como seu limite leste, um degrau topográfico que separa o primeiro do segundo planalto paranaense, o que gera um aumento localizado nos índices de precipitação e umidade e queda na temperatura.

Figura 4.1: mapa de localização da área de estudo. Convenções cartográficas: 1- cavernas; 2- depressões no terreno; 3- limite do município de Ponta Grossa; 4- Escarpa Devoniana; 5- área de afloramento do Arenito Vila Velha; 6- área de afloramento da Formação Furnas.



Aspectos geológicos

Os sedimentos que constituem as rochas da Formação Furnas foram depositados entre 421-395 Ma (Siluriano/Devoniano) (Borghi, 1993; Assine, 1999; Milani et al. 2007). Esta formação é predominantemente composta por arenitos quartzosos médios a grossos, cimentados por caulinita e illita (Assine, 1996; Melo e Giannini, 2007; e Milani et al., 2007), com cimentação por crescimento sintaxial de quartzo (De Ros, 1998; Melo e Giannini, 2007). Os arenitos apresentam estratificações plano-paralela e cruzada, e comumente intercalações de espessura geralmente decimétrica de silte e argila. Na base da formação há camadas conglomeráticas que podem ultrapassar um metro de espessura.

Para Assine (1996) a Formação Furnas tem cerca de 250 metros de espessura, sendo subdividida em unidades inferior, média e superior. Lobato e

Borghi (2005) propuseram outra subdivisão estratigráfica, na qual a formação foi compartimentada em quatro unidades, sendo que o intervalo II de Assine (1996) foi dividido em partes A e B.

Bergamaschi (1992), Assine et al. (1994) e Assine (1996) sugeriram que os sedimentos da Formação Furnas foram acumulados em ambientes de plataforma marinha e deltaicos. Entretanto, há muita discussão sobre a natureza da sedimentação desta unidade, principalmente sua seção conglomerática inferior, totalmente sem fósseis (Milani et al., 2007). Alguns autores afirmam que a deposição da Formação Furnas ocorreu em sistemas fluviais de canais anastomosados (Schneider et al., 1974; Zalán et al., 1987) e também por um grande sistema fluvial de rios entrelaçados (Pavan, 2015; Araújo, 2016).

O Arenito Vila Velha é uma subunidade da Formação Campo Mourão, com idade do Carbonífero Superior (Milani et al., 1994). É essencialmente composta por arenitos avermelhados com cimento ferruginoso, de seleção variada, de granulação areia fina a grossa, com seixos na base. Os arenitos apreentam também cimento de caulinita e crescimento sintaxial de quartzo (Bocardi, 2005). Exibem aspecto maciço frequente, além de estratificações plano-paralela incipiente e cruzada de baixo ângulo, marcas onduladas e intraclastos argilosos (Maack, 1946; Melo e Coimbra, 1996; França et al., 1996; e Melo et al., 2007).

França et al. (1996) destacaram que estes arenitos sustentam os famosos relevos ruiniformes de Vila Velha, com mais de 30 metros de espessura e centenas a mais de mil metros de extensão lateral. A espessura total do Arenito Vila Velha é controversa. Melo et al. (2007) apontaram espessura de 50 metros e Maack (1946) considerou 65 metros. Vesely (2011) considerou os valores indicados por Maack (1946) e incluiu um intervalo arenítico com 30 metros de espessura, denominado de arenitos basais, totalizando 95 metros de espessura.

Para França et al. (1996), os sedimentos formadores do Arenito Vila Velha foram depositados na forma de lobos subaquosos, como produtos de fluxos gravitacionais densos iniciados na base de geleiras. Canuto et al. (1997) apontaram que a ocorrência de estratificação cruzada de baixo ângulo e perfurações verticais e horizontais permitem interpretar sedimentação marinha rasa, influenciada por marés. Vesely (2011) apontou um ambiente de deposição proglacial e, com base na ocorrência de superfícies com sulcos e cristas glaciais nos arenitos basais da

sucessão estratigráfica denominada Arenito Vila Velha, sugeriu a passagem de gelo sobre sedimentos não consolidados.

Contexto estrutural

A Formação Furnas e o Arenito Vila Velha apresentam-se intensamente fraturados e falhados, registros de sobreposição de diferentes eventos tectônicos da história geológica regional. Tais estruturas tectônicas desempenharam importante controle na configuração do relevo nas áreas de exposição destas rochas, estando diretamente associadas com a ocorrência de inúmeros *canyons* e fendas. Duas direções principais de lineamentos estruturais se destacam, relacionadas com o Arco de Ponta Grossa (NW-SE) e com falhas do embasamento proterozoico (NE-SW), reativado pelo arqueamento crustal durante o Mesozoico (Zalán et al., 1990).

Pontes (2014) identificou sete conjuntos de lineamentos estruturais na área da presente pesquisa, denominando-os de São Jorge, Rio Verde e Mariquinha (paralelos ao eixo do Arco de Ponta Grossa) e Botuquara, Rio Quebra-Perna, Rio Guarituba e Fortaleza (paralelos à Falha Itapirapuã, estrutura tectônica do embasamento proterozoico). Além destas estruturas principais de direção predominantemente NW-SE e NE-SW, fraturas/falhas de direção leste-oeste e norte-sul também são presentes nestas rochas.

Este intenso conjunto de estruturas rúpteis facilita o intemperismo químico e a ação erosiva da água, em ambiente superficial e subterrâneo, tornando estas descontinuidades zonas preferenciais para o desenvolvimento de condutos e galerias subterrâneas.

Métodos

Os levantamentos de campo foram desenvolvidos para a caracterização de litotipos, elaboração de seções geológicas e identificação de feições geológicas de origem cárstica, incluindo cavernas, depressões no terreno, espeleogens (canais de parede e teto, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos - *tafoni*), rocha arenizada e/ou fantomizada e espeleotemas (depósitos químicos secundários em cavidades subterrâneas). A verificação da ocorrência destas feições orientou-se em inventário da geodiversidade das cavidades naturais subterrâneas da área de estudo realizado

por Pontes et al. (2018a, b). Análises estratigráficas, petrográficas, de caracterização faciológica e químicas foram realizadas em fase posterior, de escritório e laboratórios.

A caracterização das feições geológicas envolveu a descrição em campo e avaliação da possibilidade de correlação com características estratigráficas e litológicas. Esta fase baseou-se na verificação dos dados obtidos por meio de seções geológicas em que seis atributos foram averiguados: 1) composição mineralógica e parâmetros texturais, tais como granulação e seleção; 2) porosidade; 3) estruturas sedimentares; 4) estruturas tectônicas; 5) feições de intemperismo (rocha arenizada e/ou fantomizada) e; 6) padrão de ocorrência.

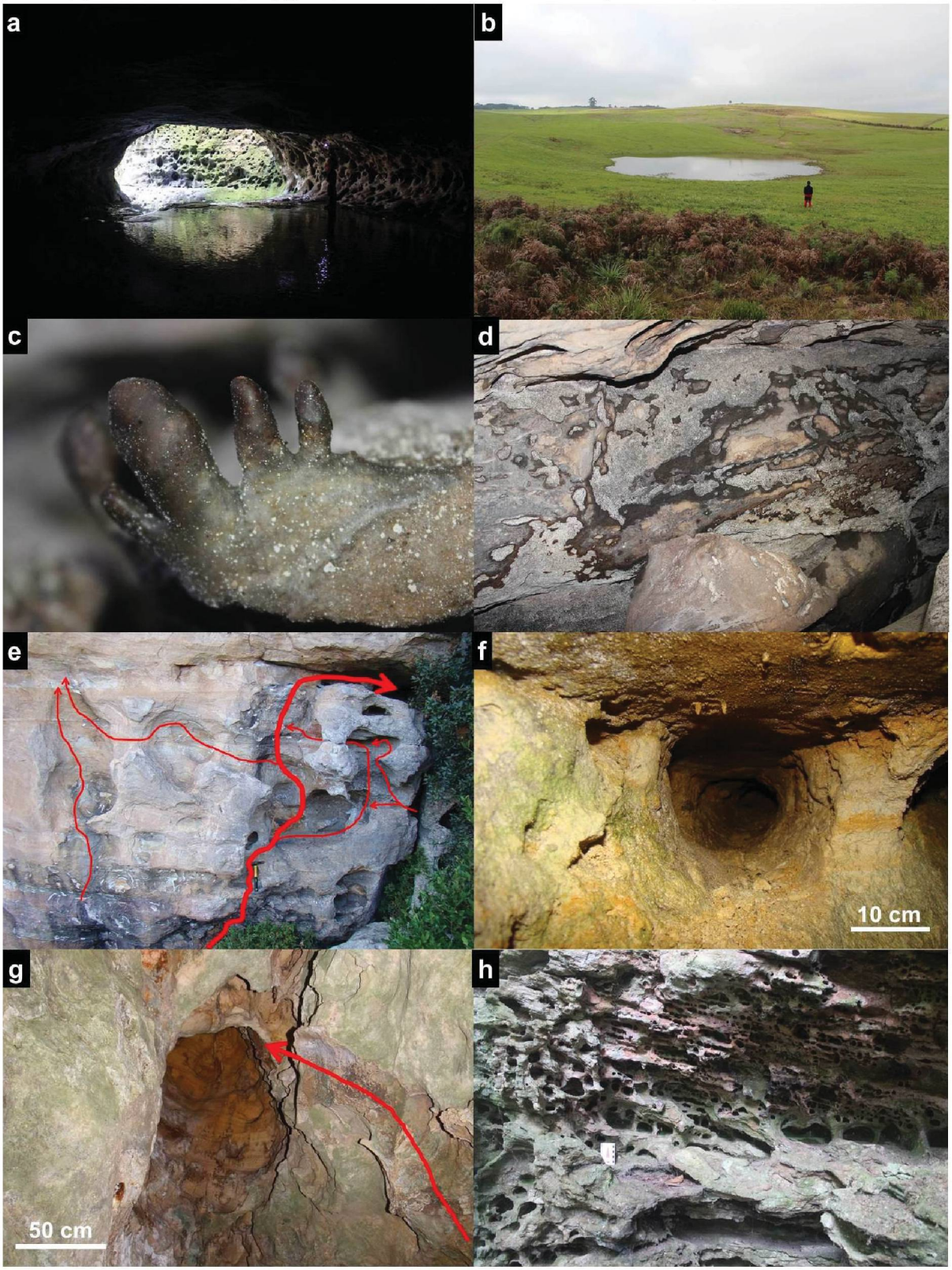
As rochas aparentemente sem alteração química, com silicificação e com padrões sugestivos de arenização e/ou fantomização foram caracterizadas quanto à composição (arcabouço, matriz e cimento) inicialmente por microscopia de luz transmitida. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitou observações com maior aumento, principalmente de registros de lixiviação do arcabouço e do cimento. Valores de porosidade total foram obtidos mediante análise visual de lâminas petrográficas e técnicas de interpretação de imagens binárias geradas por microtomografia computadorizada (micro-CT).

Para o controle e identificação de materiais observados nas análises de MEV utilizou-se espectrometria de energia dispersiva (EED). Foram elaboradas oito seções estratigráficas e dezesseis amostras foram coletadas para a realização das análises laboratoriais (oito amostras de rochas arenizadas e/ou fantomizadas, quatro amostras de rochas sem alteração química e quatro com silicificação).

Resultados e discussões

Como resultado da pesquisa, foram identificadas e caracterizadas oito feições geológicas de origem cárstica: cavernas, depressões no terreno, espeleotemas, rochas arenizadas e/ou fantomizadas, canais de teto e de parede, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos (*tafoni*) (figura 4.2).

Figura 4.2: feições geológicas de origem cárstica desenvolvidas nos quartzoarenitos da Formação Furnas (a, c, d, e, g, h) e subunidade Vila Velha (b, f): a) caverna (Sumidouro do Rio Quebra-Perna); b) depressão no terreno; c) espeleotema; d) rocha arenizada e/ou fantomizada; e) canais de teto e de parede; f) duto de dissolução; g) cúpula formando chaminé de equilíbrio e; h) alvéolos.



Cavernas

Atualmente, há o registro de 107 cavernas na área do estudo (103 na Formação Furnas e quatro no Arenito Vila Velha). Entretanto, estima-se que uma pequena porcentagem tenha sido descoberta, pois grande parte da área pesquisada integra propriedades particulares onde o acesso de pesquisadores não é permitido, dificultando a realização de prospecção e exploração. Por isso, é provável que haja grande possibilidade de novas ocorrências espeleológicas.

Em relação às dimensões, as cavernas podem apresentar poucos metros de extensão, como no caso das cavidades do tipo abrigo, ou ultrapassar dezenas e até centenas de metros de desenvolvimento, como os sistemas de fendas. Também ocorrem na forma de abismos (furnas e fendas) atingindo dezenas de metros de profundidade. Deste total de cavernas, 23 apresentam drenagem fluvial, constituindo sistemas de sumidouros e ressurgências, sendo que em oito casos o nível freático é visível no ambiente subterrâneo, formando lagos.

Pontes (2014) definiu três tipos de padrão de desenvolvimento das cavidades da Formação Furnas: 1) linear com única galeria; 2) linear composto (com galerias transversais e paralelas) e; 3) abismos circulares, semicirculares e elipsoidais. Tal classificação mostrou-se válida também para as cavernas da subunidade Arenito Vila Velha. Os abrigos configuram uma quarta categoria a ser considerada, apresentando poucos metros de desenvolvimento, como espaços comumente associados a sítios arqueológicos, com pinturas rupestres e artefatos líticos, além de espeleotemas e outras feições geológicas de origem cárstica.

As cavernas geralmente estão associadas a estruturas tectônicas (falhas e fraturas), formando cavidades do tipo fendas, com galerias retilíneas. A distribuição espacial destas feições é controlada por grandes lineamentos estruturais. Em áreas de menor intensidade e ausência de estruturas tectônicas ocorrem vazios espeleológicos. Estruturas sedimentares também contribuem para a formação de cavernas, a exemplo do Sumidouro da Mariquinha e de cavidades do tipo abrigos, condicionadas por planos de estratificação e descontinuidades entre camadas. Algumas cavernas, tais como os sumidouros do Rio Quebra-Perna e do Pitangui, constituem grandes dutos formados em intervalo freático, também com notável influência de estruturas sedimentares controlando a distribuição destas feições.

Depressões no terreno

Também conhecidas como dolinas ou depressões fechadas, tratam-se de porções rebaixadas na superfície do relevo, geralmente de forma côncava em seção e circular em planta, que variam de menos de uma dezena a centenas de metros de diâmetro. Estes recalques no terreno podem ultrapassar dez metros de desnível e estar conectados com sistemas de dutos subterrâneos. A ocorrência de depressões no terreno na área de estudo indica a atividade de processos endocársticos, associados à formação de cavidades naturais subterrâneas.

Para Theodorovicz e Theodorovicz (2008), tais feições do relevo se formam na superfície porque a areia moveu-se ou está sendo transportada para um curso de água subterrâneo. Assim, além de vazios subterrâneos, é necessária a existência de fluxo hídrico, capaz de transportar as partículas erodidas para redes de condutos e galerias mais profundos. Como estas depressões constituem pequenas bacias fechadas, são capazes de captar águas das chuvas e direcionar as águas superficiais para o subsolo.

Nos arenitos da Formação Furnas foram registradas 195 depressões no terreno e outras seis no Arenito Vila Velha. Nestas rochas, as depressões podem representar duas fases distintas, interpretadas como o estágio inicial da formação das furnas (dolinas), com o recalques pontuais na superfície do relevo devido aos desmoronamentos do teto de uma cavidade subterrânea (Maack, 1956; Soares, 1989; Pontes, 2014), bem como, podem se tratar de furnas que foram assoreadas, como é o caso da Lagoa Dourada e Lagoa Tarumã (Melo, Giannini e Pessenda, 2000 e Pontes, 2014). Pontes (2014) definiu a existência de pelo menos quatro tipos de depressões no terreno: a) de abatimento; b) com lagoa (intermitente ou perene) – possíveis furnas assoreadas; c) aluvial e; d) de dissolução.

A formação destas depressões pode estar diretamente associada às oscilações climáticas quaternárias, que segundo Bigarella et al. (2007), configuram momentos de marcantes mudanças no regime pluviométrico, alterando consequentemente o nível freático regional. Estas variações acentuam o intemperismo da rocha no interior de cavidades subterrâneas, causando o colapso do seu teto. Quando o nível freático rebaixa totalmente, as paredes e tetos das cavidades ficam suscetíveis a colapsos devido aos processos erosivos existentes na zona vadosa, forçando o rebaixamento da superfície situada acima da cavidade

(Pontes, 2014). Em alguns casos o nível freático surge no interior destas depressões fechadas, constituindo áreas de banhados (campos úmidos/brejosos), lagoas perenes e temporárias.

Maack (1956) e Sallun Filho e Karmann (2007) salientam sobre a existência de metadolomitos da Formação Bairro dos Campos (Grupo Itaiacoca) constituindo parte do embasamento das rochas da Formação Furnas no município de Ponta Grossa. Sallun Filho e Karmann (2007) avançaram nesta investigação e identificaram uma faixa de relevo rebaixado, com cerca de 4 km de largura por 15 km de extensão e desnível de até 350 metros, denominada depressão de Vila Velha. Os autores propuseram a hipótese de que as rochas metacarbonáticas do embasamento influenciam diretamente no processo de formação das furnas (poços de abatimento) e depressões no terreno.

Não se descarta a possível influência de rochas do embasamento na gênese dos grandes poços de desabamento do município de Ponta Grossa, a exemplo das furnas do Parque Estadual de Vila Velha, que atingem mais de 100 metros de profundidade. Mas a retirada de grande volume de partículas da Formação Furnas, para abertura das furnas, demandaria cavidades de grandes dimensões nas rochas metacarbonáticas subjacentes, e não há registro de cavernas nas áreas de afloramento desta unidade no município de Ponta Grossa. Além disso, das 201 depressões no terreno catalogadas, 157 se situam fora da denominada depressão de Vila Velha, sugerindo que o processo principal de dolinamento independe das rochas subjacentes.

Por outro lado, os quartzoarenitos analisados apresentaram mais feições cársticas (cavernas, depressões no terreno, sumidouros, ressurgências) do que os metadolomitos da Formação Bairro dos Campos. Contudo, considera-se necessário mais pesquisas e prospecção cárstica/espeleológica nestas rochas metacarbonáticas.

As depressões no terreno geralmente estão associadas às cavidades naturais subterrâneas. É evidente que o arcabouço tectônico condiciona a distribuição e ocorrência das depressões no terreno, independente da depressão de Vila Velha. Estruturas sedimentares contribuem para o início e evolução dos processos cársticos, constituindo linhas de fraqueza da rocha que facilita a ocorrência de abatimentos de tetos de cavernas e, consequentemente, o rebaixamento do terreno em superfície. Não foi possível estabelecer o quanto que as

variações de características texturais e porosidade influenciam na ocorrência destas feições, pois há um somatório de camadas, diferentes entre si, que colapsam para formar as depressões no terreno.

Espeleotemas

Os espeleotemas são uma das mais interessantes feições das cavernas areníticas estudadas, sobretudo por se desenvolverem em rochas sem componentes carbonáticos (cimento, matriz ou arcabouço), assim como por serem registros materiais de processos de carstificação nas rochas da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha. Seis variedades de espeleotemas são conhecidas e descritas: 1) arborescentes (corais), 2) cogumelos, 3) estalactíticos, 4) colunares com crescimento horizontal/ascendente, 5) estalagmíticos e 6) fibrosos. Os quatro primeiros tipos são constituídos por opala-A, sílica criptocristalina e caulinita criptocristalina. Os estalagmíticos apresentam óxido de ferro amorfo associado à goethita e hematita e os fibrosos são cristais de gipsita (ver item 2.2 desta tese).

A gênese dos espeleotemas está relacionada a processos inorgânicos e orgânicos. No primeiro caso, a sílica pode ser precipitada em sucessivos ciclos de evaporação, conforme destacado por Webb e Finlayson (1984), Hill e Forti (1997) e Wray (1999). Bioassinaturas e estruturas completas de cianobactérias, diatomáceas e outros micro-organismos capazes de precipitar sílica foram identificados em espeleotemas, apontando a possibilidade de participação de processos orgânicos na formação destas feições. Cañaveras et al. (2001), Baskar et al. (2007), Aubrecht (2008), Sallstedt et al. (2014), Zepeda Mendoza et al. (2016) e Sauro et al. (2018) apontaram que o metabolismo de micro-organismos, com a produção de biofilmes, tem um importante papel na gênese de espeleotemas, pois possibilitam a precipitação da sílica.

Os espeleotemas estudados, dos tipos arborescente, estalactítico e colunar com crescimento horizontal/ascendente, apresentam microlaminações bem definidas, com lâminas sobrepostas (indicando o sentido de crescimento do espeleotema). Três microfácies foram identificadas, denominadas de interior, intermediária e exterior. Os espeleotemas do tipo estalagmítico possuem duas microfácies distintas intercaladas. A variedade denominada cogumelo não apresenta

estrutura interna definida. Os depósitos do tipo fibroso são constituídos de cristais de gipso.

Os espeleotemas tendem a se desenvolver principalmente em litofácies de arenito fino a grosso, de seleção variável. Menos frequentemente, na Formação Furnas, esses depósitos podem ocorrer em camadas síltico-argilosas e estratos conglomeráticos compostos por grânulos e seixos. Os planos de estratificação e fraturas controlam o desenvolvimento dos espeleotemas. Em alguns casos, feições de intemperismo, como rochas arenizadas e/ou fantomizadas, estão associadas à ocorrência destes depósitos minerais secundários, não constituindo regra. Da mesma forma, existem registros de espeleotemas em arenitos friáveis, como também em porções silicificadas por processos diagenéticos, atividades tectônicas e remobilização durante o intemperismo. Estes depósitos se desenvolvem em ambientes de penumbra ou totalmente afóticos (interior de cavernas) e também em locais com luz (cavernamentos formados em exposições de superfície).

Rochas arenizadas e/ou fantomizadas

São porções de rochas alteradas *in situ*, produtos da carstificação por arenização e/ou fantomização (primocarste), geralmente formadas devido ao intemperismo químico em zonas freáticas, com fluxo lento e baixa energia. Nestas condições, o movimento das águas subterrâneas não afeta a estrutura original da rocha, ou seja, há remoção do material solúvel, sendo preservada a estratificação, o plano de acamamento e outras características de sedimentação do entorno.

O processo de arenização foi proposto por Martini (1979, 1982) e Jennings (1983), e o produto gerado por este processo foi denominado de rocha arenizada, conforme apontado por Wray e Sauro (2017) e Aubrecht et al. (2017). Rodet (1996) descreveu em detalhe a ocorrência destes registros de alteração em rochas carbonáticas, denominando o processo de primocarste e o produto de “alterita”. Posteriormente, Vergari e Quinif (1997), Quinif (1999), Kaufmann et al. (1999), Häuselmann e Tognini (2005), Bruxelles, Quinif e Wiénin (2009), Laverty (2012) e Dubois et al. (2014) chamaram o processo de fantomização e o produto de “rocha fantasma”. Recentemente, Quinif et al. (2014) nomearam e definiram esse processo como a teoria da carstificação por fantomização.

Rodet (1996) classificou a rocha alterada *in situ* ('alterita') em "aloalterita" e "isoalterita". Quando o nível freático rebaixa, a água que anteriormente ocupava os poros da rocha deixa esses espaços e o material resultante desse processo pode perder o suporte devido ao rearranjo do material detrítico, devido à lixiviação de minerais mais solúveis. Nestes casos, essas porções colapsam sobre si mesmas, desenvolvendo um vazio no topo do material alterado, gerando rocha arenizadas e/ou fantomizadas com alteração volumétrica ('aloalterita'). Quando a rocha é alterada e não há colapso sobre si, mantendo as características físicas iniciais, o produto é chamado de rocha arenizadas e/ou fantomizadas isovolumétrica ('isoalterita').

A rocha arenizadas e/ou fantomizadas pode ser confundida com depósitos de sedimentos alóctones, mas a identificação de estratificação original da rocha, composição mineral e outras estruturas sedimentares permitem excluir tal hipótese. Rodet (1996) afirma que a rocha que passou por processo de primocarste não é um depósito aluvionar que preenche um conduto ou galeria de cavernas com sedimentos exógenos, mas é a transformação *in situ* resultante da alteração da rocha geralmente a partir de fraturas e estruturas sedimentares.

O desenvolvimento de rochas arenizadas e/ou fantomizadas pode acontecer em três casos: a) em toda a camada; b) em torno das descontinuidades, como estruturas tectônicas ou estruturas sedimentares deposicionais e; c) em porções isoladas (formando halos de intemperismo). Na Formação Furnas, esta feição ocorre condicionada aos três casos descritos e no Arenito Vila Velha, apenas aos dois últimos.

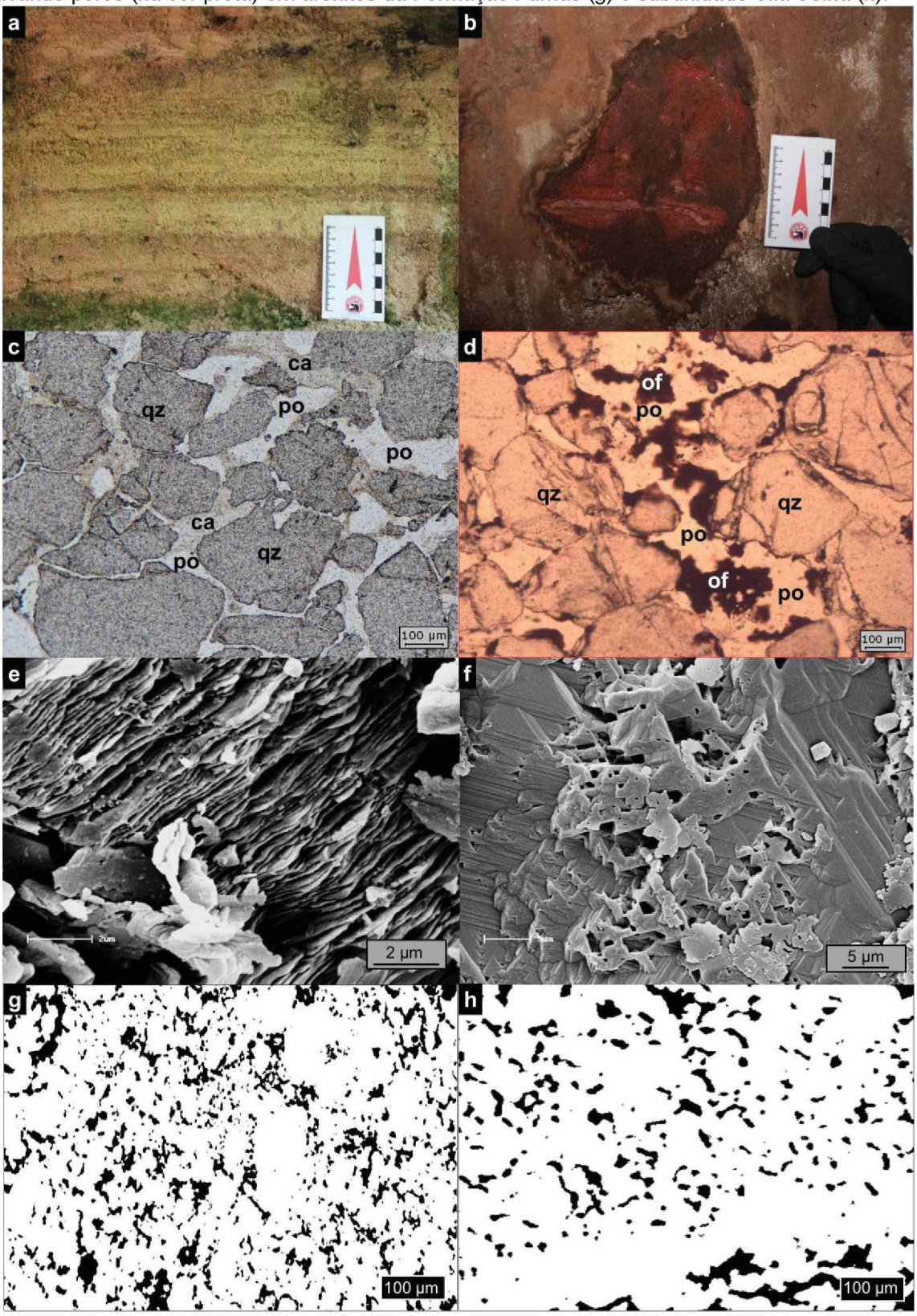
Em catorze cavernas e várias exposições de superfície da área de estudo ocorrem rochas arenizadas e/ou fantomizadas com mudanças volumétrica e isovolumétrica (figuras 4.3a). Regularmente, estas feições de alteração química estão associadas a descontinuidades físicas, sedimentares ou tectônicas, com padrão de ocorrência relacionado principalmente a litofácies de arenitos médios a grossos. Também ocorrem em camadas conglomeráticas geralmente compostas por grânulos, não havendo registro destas feições em camadas síltico-argilosas e estratos conglomeráticos compostos por seixos. No Arenito Vila Velha, geralmente estão associadas a intraclastos de argila (figura 4.3b). Estas porções da rocha de granulação fina servem como selantes para a água que infiltra no corpo rochoso,

proporcionando concentração da umidade em porções específicas, o que contribui para a alteração química da rocha.

A dissolução dos cimentos (caulinítico para a Formação Furnas e óxido ferruginoso para o Arenito Vila Velha) (figura 4.3c,d,e) e dos grãos de quartzo (incluindo corrosão em zonas de sobrecrescimento sintaxial de quartzo) é presente nas rochas arenizadas e/ou fantomizadas (figuras 4.3f). O intemperismo químico possibilita o desenvolvimento de porosidade secundária intragranular e intergranular, com presença de poros conectados formando microcanais. As rochas arenizadas e/ou fantomizadas têm porosidade total, estimada a partir da análise visual de lâminas petrográficas, de 15% para a Formação Furnas e 20% para o Arenito de Vila Velha. As análises com tomografia computadorizada (micro-CT) apontaram valores médios de porosidade total de 16,5% (variando de 16,07 a 16,96%) para a Formação Furnas e 23,7% (23,68 a 23,79%) para o Arenito Vila Velha (figura 4.3g, h).

Com base nos estudos de Borghi (1993) e Lobato e Borghi (2005) é possível afirmar que a porosidade total média para as rochas da Formação Furnas é de 7,5% (variando de 2 a 13%), e de acordo com Bocardi (2005) o Arenito Vila Velha apresenta 6,5% de porosidade total média (variando de 2 a 13%). Em comparação com arenitos inalterados de ambas as unidades geológicas, com baixa porosidade, claramente estas porções de alteração possuem porosidade muito mais alta (em relação aos valores médios obtidos pela tomografia, aumento de 120% para a Formação Furnas e 265% para o Arenito Vila Velha).

Figura 4.3: exemplos de alteração *in situ* na Formação Furnas (a) e Arenito Vila Velha (b). Fotomicrografias de rochas fantomizadas da Formação Furnas (c) e subunidade Vila Velha (d), mostrando porosidade secundária devido à dissolução dos cimentos (legenda: **po**- poro; **qz**- quartzo; **ca**- caulinita; **of**- óxido de ferro). Imagens de MEV (elétrons secundários) mostrando a dissolução da caulinita (e) e de grão de quartzo com crescimento sintaxial (f). Imagens binárias de micro CT indicando poros (na cor preta) em arenitos da Formação Furnas (g) e subunidade Vila Velha (h).



Canais de teto e parede

Estas feições cársticas são canais desenvolvidos no teto e paredes de cavidades, originados da ação geoquímica da circulação da água subterrânea. Para sua formação é preciso que ocorra uma subida de fluxo, ou seja, a água que sobe esculpe canais de seção semicirculares côncavos nas paredes e no teto, ao longo do eixo de desenvolvimento da galeria. Os canais de teto podem exibir formas de desenvolvimento retilíneas ou sinuosas. Essas feições também aparecem em afloramentos e paredões rochosos, o que indica que estes locais configuravam ambientes subterrâneos no passado.

Canais de teto e parede têm sido comumente observados em cavernas hipogenéticas, configurando o conjunto morfológico de fluxo ascendente (*MSRF – morphologic suite of rising flow*) (Klimchouk, 2007; 2009). De acordo com Stafford et al. (2008) e Klimchouk (2009) a água subterrânea pode ascender de cavidades inferiores para galerias superiores através de alimentadores (condutos) e subindo através de meio-tubos de parede e teto até as saídas (cúpulas e chaminés de equilíbrio).

Estas feições geológicas são mais incomuns de serem encontradas nas rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha, bem como em outros quartzoarenitos, quando comparados com rochas carbonáticas solúveis, principalmente em calcários. Suchý et al. (2017), em um estudo recente sobre arenitos arcosianos na República Checa, mostraram ocorrência expressiva do conjunto morfológico de fluxo ascendente (MSRF), desenvolvido em arenitos, indicando sua origem hipogenética subsuperficial.

Nas rochas analisadas, os canais de tetos e paredes aparecem associados apenas com algumas feições típicas de um MSRF, não havendo registro do conjunto completo. Na Formação Furnas é mais comum a ocorrência de canais de tetos conectados a dutos de dissolução e estruturas alveolares. Contudo, as poucas evidências não permitem afirmar a ocorrência de carstificação hipogenética na área de estudo, merecendo mais investigações.

Por outro lado, segundo Pasini (2009), os canais de teto seriam originados a partir da erosão antigravitativa (paragênese), erosão ascendente causada pelas águas subterrâneas que circulam sob pressão. Mas esse processo só ocorre quando a galeria está preenchida por sedimentos que obstruem as passagens e direcionam

a dissolução freática para cima, exemplo típico em cavernas epigenéticas. Na área pesquisada não há indícios de galerias preenchidas por sedimentos.

A erosão ascendente pode estar estreitamente relacionada com a presença de camadas síltico-argilosas. Estes estratos, geralmente de espessura decimétrica, atuam como camadas selantes que podem impedir a subida de águas subterrâneas, forçando uma erosão antigravitativa em casos específicos. A água tende a circular preferencialmente ao longo destes estratos até atingir pontos que permitem a continuidade da ascensão do fluxo, principalmente quando atingem descontinuidades verticais da rocha. No Sumidouro da Mariquinha (Formação Furnas) um canal de teto se desenvolveu em um estrato de constituição síltico-argilosa a areia fina, um exemplo da hipótese apresentada anteriormente.

Na Formação Furnas e no Arenito Vila Velha, comumente estes canais foram encontrados em litofácies de arenitos finos a grossos, com seleção variada, associados a estruturas tectônicas. Alguns canais de teto se desenvolvem em rochas arenizadas e/ou fantomizadas, em arenito extremamente friável. No Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Formação Furnas) e nos paredões rochosos da Fortaleza (Arenito Vila Velha) o desenvolvimento dos canais foi controlado por fraturas, e eles estão conectados a cúpulas no primeiro caso e alimentadores no segundo.

Dutos de dissolução

Os dutos de dissolução (condutos, tubos) são canais subterrâneos desenvolvidos na rocha, com diâmetro que varia de centímetros a metros, formados a partir da ação química de águas subterrâneas. Esta feição geológica ocorre no interior de cavernas e em exposições de superfície. Podem apresentar três padrões de desenvolvimento: linear, anastomosado (labiríntico) e dendrítico. Os condutos do tipo dendrítico formam redes de drenagem e pequenos tubos conectados entre si, formando canais maiores, estabelecendo um padrão hierárquico, semelhante às redes de drenagem fluvial de superfície.

Wray (2009) apresentou importante contribuição sobre os condutos de drenagem freática, com base em estudos destas feições feitos em quartzoarenitos australianos. O autor constatou que os dutos são formados na zona epifreática, uma porção subterrânea de oscilação do nível freático, que varia entre áreas vadosas e

saturadas. Melo (2013) correlacionou a gênese de determinados dutos nos arenitos da área de estudo com perfurações realizadas por cupins. Contudo, estes dutos relatados pelo autor apresentam diâmetro menor que um centímetro e ocorrem de forma mais caótica, com pouca ou nenhuma relação de formação com aspectos texturais e descontinuidades da rocha.

Os dutos de dissolução são importantes para identificar uma área cárstica e podem ser fator decisivo para o entendimento da dinâmica de aquíferos neste tipo de terreno. Pontes (2014) enfatizou o desenvolvimento de dutos em certos estratos da Formação Furnas e a ausência total em outros, correlacionando as oscilações freáticas durante a evolução da paisagem regional às mudanças climáticas quaternárias. Outros autores também descreveram a existência de dutos de dissolução na Formação Furnas e Arenito Vila Velha (*e.g.* Melo, 2006; Melo et al., 2007; Melo e Giannini, 2007; Letenski et al., 2009; Massuqueto, 2010; Massuqueto, Guimarães e Pontes, 2011; Flügel Filho, 2012; Melo et al., 2015).

Em ambas as unidades geológicas os dutos de dissolução têm um padrão de ocorrência relacionado principalmente a litofácies areníticas finas a médias e seleção variada. Esses tubos se desenvolveram, estratigraficamente, principalmente acima de camadas de constituição de areia fina, síltico/argilosas e síltico/arenosas, provavelmente pelo comportamento selante destes estratos. Nessas camadas de baixa permeabilidade formam-se aquíferos suspensos, forçando a circulação horizontal da água, auxiliando no desenvolvimento dos dutos de dissolução. Nestes casos, pode ocorrer a coalescência destes tubos e a formação de dutos anastomosados, produzindo micropilares de poucos centímetros de altura.

Um exemplo expressivo de camada impermeabilizante ocorre em um afloramento da Formação Furnas na área urbana de Ponta Grossa. Ao longo de aproximadamente 30 metros de extensão, há dezessete dutos de dissolução desenvolvidos acima de uma camada síltico-argilosa. Os tubos se desenvolveram em arenito friável com granulação de areia fina e apresentam circulação ativa de água formando nascentes. A 3,5 metros acima, no mesmo afloramento, sete condutos são desenvolvidos na descontinuidade entre duas camadas compostas por arenitos de granulação média.

A baixa cimentação em camadas síltico/argilosas e síltico/arenosas torna-se um fator favorável para a erosão descendente e o consequente desenvolvimento de dutos de dissolução nestes estratos, sobretudo em zonas epifreáticas.

Regularmente, os dutos são controlados por anisotropias criadas por estruturas sedimentares, como planos de estratificação e descontinuidades entre estratos. No Arenito Vila Velha, os dutos aparecem principalmente no contato entre camadas. Em alguns casos, as estruturas tectônicas podem controlar a formação dessas feições geológicas.

A porosidade dos arenitos onde os condutos estão desenvolvidos é variada. Existem condutos associados a halos de alteração, porções com ocorrência de rochas arenizadas e/ou fantomizadas, porém também se formam em áreas com silicificação, zonas de maior resistência e com baixa porosidade. Na Formação Furnas existem casos raros em que os tubos estão em estratos conglomeráticos e síltico-argilosos.

A ocorrência de condutos tende a ser iniciada pela criação de núcleos de intemperismo químico em ambiente freático. Nesta etapa inicial, os constituintes minerais são alterados quimicamente e o material solúvel é transportado através dos interstícios granulares e das descontinuidades da rocha. O segundo momento envolve a zona epifreática, onde ocorre a coalisão destes núcleos de intemperismo e os tubos começam a se formar. Quando processos hidrológicos de maior energia são instalados, na zona vadosa, os dutos são aumentados e a rocha remanescente (residual) é removida.

Em alguns casos, os dutos de dissolução podem ser considerados semelhantes aos alimentadores descritos por Klimchouk (2007, 2009). Para este autor, os alimentadores são pontos de entrada basais através dos quais os fluidos sobem do aquífero de origem para os sistemas situados acima, contribuindo para o desenvolvimento da espeleogênese hipogenética. Entretanto, assim como no caso dos canais de teto e de parede, não foram encontradas evidências suficientes para adotar este modelo carstogenético para a área da presente pesquisa.

Cúpulas

As cúpulas são feições geológicas desenvolvidas no teto das cavernas e formadas a partir do processo de intemperismo químico em ambiente com oscilação de nível freático, na denominada zona epifreática. Segundo Stafford et al. (2008) as cúpulas têm forma de domos e são estruturas formadas ao longo do teto de cavernas, em porções onde os fluidos ascendentes se deslocam para áreas

superiores com menor pressão causando o processo de dissolução. Aqueles autores também salientam que as cúpulas constituem registro do último nível da água subterrânea no local.

As cúpulas apresentam crescimento ascendente e quando evoluem culminam com a formação de chaminés de equilíbrio, semelhantes a dutos verticais (figura 4.2g). Klimchouk (2009) nomeou estas feições como cúpulas em cadeia ascendente e as classificou como pontos de saídas de um fluxo em ascensão. Klimchouk (2007) apontou que estas saídas são reentrâncias arredondadas, cúpulas ou tubos verticais que se elevam do teto de passagens e salões em um determinado nível do sistema de cavernas e se conectam ao nível superior, ou finalmente ao limite de descarga (base da formação sobrejacente ou à superfície do terreno). Na área de estudo não ocorre exemplo de chaminés ligando diferentes níveis de cavernas, mas o Poço de Santa Madalena, em arenitos da Formação Furnas, constitui exemplo de chaminé de equilíbrio conectada com a superfície.

Esta feição cárstica podem indicar processos hipogenéticos na formação de cavernas. Entretanto, alguns estudos fornecem evidências de dissolução desencadeada por um sistema de convecção mista, independente dos padrões genéticos da caverna (Stafford et al., 2008; Klimchouk, 2009). Em outras palavras, isso demonstra a possibilidade de ter características cársticas que evidenciem pontualmente processos hipogenéticos, qualquer que seja o tipo de gênese de todo o sistema subterrâneo.

Na Formação Furnas e no Arenito Vila Velha as cúpulas apresentam um padrão de ocorrência relacionado principalmente com a litofácies de arenito de granulação fina a grossa, de seleção variável. Mas na Formação Furnas estas feições também ocorrem em estratos síltico-argilosos, como no caso do Sumidouro da Mariquinha. Algumas cúpulas deste caso também cresceram verticalmente, ao ponto de formarem chaminés de equilíbrio em camada arenosa com granulação decrescente ascendente, variando de areia grossa a areia fina/média.

A Gruta da Fortaleza, desenvolvida no Arenito Vila Velha, mostra uma grande cúpula com mais de quatro metros de diâmetro e desenvolvimento vertical. Neste caso, a cúpula é controlada por estruturas tectônicas e, devido ao tamanho da feição geológica, é possível classificá-la como um grande domo. O Sumidouro do Rio Quebra-Perna apresenta exemplo notável de cúpulas associadas a rochas intemperizadas.

Dubois et al. (2014) e Klimchouk (2017) relatam que as cúpulas são uma forma freática típica, resultante da remoção mecânica de rochas arenizadas e/ou fantomizadas. Há registros de feições de intemperismo químico nas cúpulas, como halos de alteração formando arenitos friáveis, mas em alguns casos a rocha ao redor das cúpulas apresenta-se com crostas rígidas silicificadas. Como já salientado anteriormente, em alguns casos, estratos compostos por material de granulação síltica-argilosa, podem servir como camadas selantes, fazendo com que a água freática circule horizontalmente. Nestas condições, dutos de dissolução podem ser formados, como também alvéolos.

Alvéolos (*tafoni*)

De acordo com Klimchouk (2017), embora existam vários estudos, alvéolos são considerados uma das feições geológicas mais enigmáticas e intrigantes. Os alvéolos ou *tafoni* (plural de *tafone*) são feições de forma côncava circular que atingem poucos centímetros a metros de diâmetro, formadas na parede e teto de cavidades e exposições rochosas superficiais. Também é possível identificar alvéolos no piso de cavernas, mas é menos comum (embora não deva ser confundido com panelas ou caldeirões de gigantes, que são desenvolvidos pelo movimento turbilhonar da água de rios). Estas feições geológicas podem se formar separadamente ou em grupo, formando cadeias de alvéolos denominadas de favos de mel (*honeycomb structures*).

Quando se desenvolvem no teto é normal confundi-las com cúpulas. No entanto, estas têm a concavidade superior mais arredondada, formato dômico e normalmente são mais profundas, enquanto os alvéolos apresentam concavidades nas laterais, além do topo.

Condições diversas da rocha podem controlar a criação e desenvolvimento de alvéolos, como composição mineral, tipo e quantidade de cimento e matriz e porosidade do arenito (Young, Wray e Young, 2009; Ahmadi et al., 2015, Klimchouk, 2017). Além disso, segundo Melo (2013), há casos em que alguns alvéolos podem evoluir a partir de perfurações de cupins. Os cupins possibilitam o aumento pontual de matéria orgânica, resultando na liberação de ácidos orgânicos, dissolução do cimento e desenvolvimento de alvéolos.

Entende-se que a ação biológica através dos tubos cupins, liquens e musgos tem função importante na evolução do alvéolo, mas no ambiente superficial. As perfurações de cupins identificadas na Formação Furnas e no Arenito Vila Velha são pequenas, geralmente com menos que um centímetro de diâmetro. Da mesma forma, essas perfurações tendem a ocorrer mais dispersas e, às vezes, sem distribuição preferencial, diferentemente dos alvéolos, que estão organizados com maior uniformidade e geralmente são controlados por estruturas sedimentares.

O modelo mais aceito sobre a gênese dos alvéolos relaciona-se a processos de intemperismo químico em ambiente subterrâneo (Young, Wray e Young, 2009; Ahmadi et al., 2015). Os alvéolos podem se desenvolver isolados ou em grupo, sendo habitual se conectarem, formando condutos. Assim, é possível classifica-los como núcleos de dissolução em ambiente freático, formados pela carstificação por arenização e fantomização. Em alguns casos a rocha arenizadas e/ou fantomizadas é removida por ação mecânica de fluxo aquoso em cavernas e também em superfície.

As estruturas tectônicas têm função importante no desenvolvimento dos alvéolos nos quartzoarenitos analisados nesta pesquisa. Este é um exemplo de carstificação em fraturas, outra evidência de ascensão de fluidos por descontinuidades de alto ângulo de mergulho e que interagem com outras estruturas, tais como estratificação e acamamento (Klimchouk, 2017). Como sugerido pelo autor, alvéolos também podem ser considerados como indicativos e diagnósticos para a carstificação hipogenética. Mas halos de alteração na área de estudo, identificados pela diferença de cor e grau de coesão do material rochoso, parcialmente removidos formando estruturas alveolares (cadeia de alvéolos), aponta uma fase inicial de preparação, período em que a rocha foi submetida ao intemperismo químico, ou seja, primocarste.

Os alvéolos são desenvolvidos principalmente em arenitos finos a grossos, com seleção variada. Na Formação Furnas também ocorrem em estratos conglomeráticos compostos por grânulos, em camadas com grãos de tamanho de seixos não há registros de alvéolos.

Em ambas as unidades geológicas existem situações em que os alvéolos são encontrados apenas em um estrato específico, e as camadas inferior e superior estão desprovidas alvéolos. Este fato pode estar relacionado à diferença na granulação/permeabilidade e cimentação das rochas de cada estrato, como também

pode revelar intervalos da evolução geológica local em que o nível freático passou por oscilações devido a mudanças climáticas.

Geralmente a rocha ao redor e o interior do alvéolo apresenta crostas rígidas silicificadas de espessura milimétrica. Estruturas sedimentares controlam a distribuição, forma e desenvolvimento destas feições cársticas. Em camadas bem estratificadas são comuns estruturas alveolares, e quando há estratificação cruzada, estas feições acompanham a direção e o ângulo do mergulho (figura 4.2h).

Controle estratigráfico e litológico das feições cársticas

O quadro 4.1 resume as características dos padrões de ocorrência das feições de origem cárstica em rochas da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha. Algumas se desenvolvem em diferentes litofácies, como as conglomeráticas (espeleotemas, dutos de dissolução, alvéolos) e as síltico-argilosas (espeleotemas, canais de teto, dutos de dissolução e cúpulas), contudo, estas ocorrências são menos frequentes.

Há um nítido controle estratigráfico e litológico, com predomínio em arenitos de granulação média. Conforme já apontado por vários autores (*e.g.* Maack, 1956; Soares, 1989; Melo et al., 2011; Pontes, 2014), as estruturas sedimentares, como planos de estratificação, descontinuidades entre camadas e estruturas tectônicas (fraturas e falhas) exercem controle determinante no número, tipo e dimensões das feições cársticas.

Quadro 4.1: Características do padrão de ocorrência das feições cársticas da área de estudo.

Feição cárstica	padrão de ocorrência
Cavernas	desenvolvimento controlado por estruturas tectônicas e sedimentares. Podem se desenvolver em diferentes litofácies. Em casos específicos camadas de granulação fina (principalmente compostas por silte e argila) podem auxiliar no desenvolvimento de galerias. Neste caso, os estratos atuam como selantes, forçando a circulação horizontal da água.
Depressões no terreno	feições de abatimento/depressões diretamente associadas à cavidades subterrâneas, por sua vez controladas por estruturas tectônicas e sedimentares. Podem se desenvolver em diferentes litofácies.
Espeleotemas	feições de precipitação em arenitos com granulação fina a grossa, controlados por planos de estratificação, descontinuidades entre camadas e fraturas.

Rochas arenizadas e/ou fantomizadas	litofácies de arenitos de textura média a grossa; também em estratos conglomeráticos geralmente compostos por grânulos, regularmente controladas por estruturas tectônicas. No Arenito Vila Velha, geralmente ocorrem associadas a camadas delgadas de argila ou intraclastos com espessura de até um centímetro.
Canais de teto e parede	litofácies de arenito de textura fina a grossa, associada a estruturas tectônicas.
Dutos de dissolução	estratos compostos por arenitos de textura fina a média, desenvolvidos principalmente em descontinuidades entre camadas e acima de estratos com granulação mais fina (silte e argila).
Cúpulas	Camadas areníticas de granulação fina a grossa. Estruturas sedimentares influenciam a gênese dessas feições geológicas.
Alvéolos (*tafoni*)	litofácies de arenitos de textura fina a grossa. Na Formação Furnas também aparecem em estratos conglomeráticos compostos por grânulos. Estruturas sedimentares e tectônicas também exercem controle.

Aspectos genéticos

Primocarste

O processo cárstico registrado nos quartzoarenitos da Formação Furnas e subunidade Vila Velha foi interpretado como do tipo arenização por Melo e Giannini, (2007), Pontes (2010), Pontes (2014) e Melo et al. (2015). Contudo, Wray e Sauro (2017) em recente revisão e atualização sobre processos e formas de intemperismo em quartzoarenitos e quartzitos, apontaram que no processo de arenização, a rocha deve ser essencialmente composta por quartzo (monominerálica), arcabouço e cimento quartzoso, e apenas uma fração dos grãos de quartzo é removida por dissolução, restando uma rocha com alta porosidade e até mesmo areia completamente solta. Ao contrário, os autores apontam que o processo de fantomização envolve casos onde a rocha apresenta composição poliminerálica, que compreende componentes mais solúveis, que são dissolvidos, e deixam minerais residuais menos solúveis preservados. Martini (1979; 1982) e Jennings (1983), pioneiros do modelo da arenização em quartzitos e quartzoarenitos, apresentaram este modelo de intemperismo químico para rochas com cimentação de sílica, principalmente sobrecrescimento de grãos de quartzo. Nesta interpretação, as rochas que apresentam outros componentes como cimento, que não sejam silicosos, teoricamente não se enquadrariam no modelo da arenização.

O arcabouço dos arenitos da Formação Furnas é composto em média por 85,5% (variando entre 81 e 90%) de quartzo (Borghi, 1993 e Lobato e Borghi, 2005). O cimento destes arenitos é essencialmente caulinítico, embora ocorra illita e sobrecrescimentos sintaxiais de quartzo. O arcabouço do Arenito Vila Velha é constituído em média por 94% (variando de 90 a 98%) de quartzo, conforme Bocardi (2005). Possui cimento de óxidos de ferro e caulinita, e casos de sobrecrescimentos sintaxiais em grãos de quartzo. Diferente das condições identificadas por Martini (1979; 1982) e Jennings (1983), em que o intemperismo químico operou em rochas quartzíticas, onde os grãos de quartzo apresentam contatos suturados e o cimento é essencialmente sílica resultante do sobrecrescimento sintaxial de quartzo, nos quartzoarenitos da área de estudo há ataque químico ao cimento caulinítico e óxidos de ferro. Desta forma, a dissolução do cimento é preponderante, e a desagregação destes arenitos pode acontecer antes da dissolução do quartzo propriamente dito. O processo cárstico e as feições resultantes, dominantemente, são resultado do intemperismo químico dos minerais cimentantes dos quartzoarenitos. Todavia, mesmo com estas condições, a dissolução dos grãos de quartzo, e de seus sobrecrescimentos sintaxiais, é evidente nas amostras de rochas intemperizadas *in situ* na área de estudo.

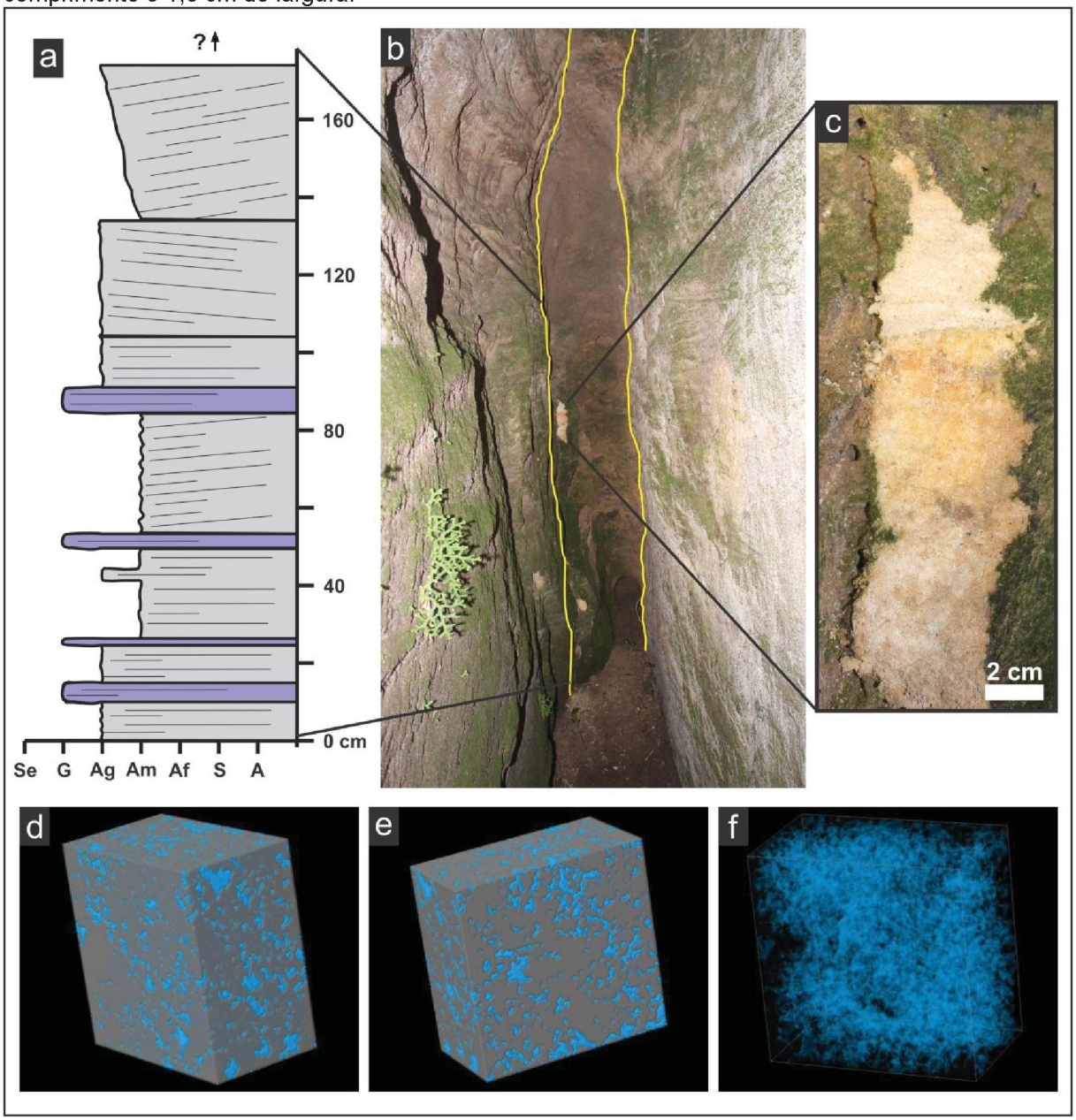
Com isso, é possível considerar que a carstificação nos quartzoarenitos estudados resulta de processos de arenização e fantomização, prevalecendo este último. Estes processos são baseados em concepção diferente da carstogênese clássica, com uma lixiviação de parte dos minerais da rocha e conservação *in situ* de materiais menos solúveis, configurando assim, um processo relacionado ao modelo do primocarste. Ao contrário do carste tradicional, o volume inicialmente criado pela dissolução não necessariamente abre galerias, dutos e cavernas, mas se manifesta como poros distribuídos ao longo da rocha alterada e condicionados por anisotropias criadas por estruturas tectônicas ou sedimentares (Quinif, 1999).

Segundo Rodet (1996) e Dubois et al. (2014), o primocarste ou a carstificação por fantomização tem três fases: 1) a rocha é quimicamente alterada *in situ*, em ambiente freático com fluxo lento e baixa energia. Minerais mais solúveis dissolvem-se e os resistentes permanecem na posição sedimentar original. Esse processo tende a se formar em zonas de descontinuidades ou anisotropias, como estratificações, planos de acamamento e estruturas rúpteis; 2) com o rebaixamento do nível freático, devido à criação de espaço pela lixiviação parcial de cimentos e

grãos de minerais mais instáveis, o material alterado pode perder o suporte devido ao rearranjo entre os grãos, formando rochas arenizadas e/ou fantomizadas com alteração volumétrica. Neste caso, quando a rocha alterada não colapsa em espaços criados pela lixiviação, assume característica isovolumétrica; 3) processos hidrológicos de maior energia são introduzidos e a ação das águas superficiais e subsuperficiais atuam, aumentando a remoção de partículas do arcabouço da rocha. Nesta fase os condutos são formados, fraturas e passagens são ampliadas e cavernas são desenvolvidas. Em alguns casos, a zona epifreática pode contribuir para a remoção da rocha intemperizada *in situ* após a fase um. A oscilação no nível da água freática pode auxiliar na desagregação do material, tornando a rocha arenizada e/ou fantomizada mais suscetível a processos de erosão.

Como apenas partes dos arenitos estudados são dissolvidas, há geração de resíduos. Duas situações são possíveis: a) os resíduos são transportados por sistema de condutos, ainda em contexto freático, gerando remobilização do material e abertura de condutos; b) os condutos não são abertos de maneira eficiente em contexto freático, são criadas zonas de alteração (formação de rocha arenizada e/ou fantomizada) e os dutos são abertos na medida em que as águas superficiais passam a agir no sistema. Nestes casos, pode haver transporte de material. Contudo, devido à baixa eficiência de escoamento destes resíduos, os condutos são entupidos. A dimensão das zonas com rochas arenizadas e/ou fantomizadas varia de porções centimétricas a métricas. Destaca-se o registro na Furna do Anfiteatro (Formação Furnas), onde a porção final de uma galeria apresenta rocha fantomizada em toda a passagem, configurando espeleogênese por fantomização em fratura (figura 4.4).

Figura 4.4: galeria em cavidade subterrânea da Formação Furnas exibindo passagem fantomizada. Seção geológica da rocha alterada *in situ* mostrando predomínio de arenito médio a grosso (a) (convenções: **Se**- seixo; **G**- grânulo; **Ag**- areia grossa; **Am**- areia média; **Af**- areia fina; **S**- silte; **A**- argila). Porção com rocha fantomizada destacada pelas linhas amarelas (b) e detalhe mostrando estruturas sedimentares preservadas (c). Modelo 3D gerado por microtomografia computadorizada evidenciando alta porosidade da rocha fantomizada (cor azul) (d; e) e significativa conectividade entre os poros (f). A porção da amostra analisada no micro CT apresenta 2,5 cm de altura, 2,5 cm de comprimento e 1,0 cm de largura.



A alta disponibilidade hídrica da área de estudo, com densa rede de drenagem (superficial e subterrânea) e alta pluviosidade, juntamente com o elevado gradiente hidráulico devido a marcantes desníveis topográficos associados às fendas, *canyons* e escarpamentos, propiciam processos hidrológicos de maior energia, com elevado potencial erosivo. Devido a estas características, poucos registros de rochas arenizadas e/ou fantomizadas foram preservados na Formação

Furnas e subunidade Vila Velha, pois a intensa erosão mecânica atuante no relevo em questão exumou estas porções de intemperismo *in situ* verificada em cavernas e exposições superficiais.

Mecanismos do intemperismo químico

Para entender a carstificação em quartzoarenitos é importante identificar as condições químicas para a dissolução do quartzo e dos minerais que constituem o cimento destas rochas. Conforme aponta Wray (2013), as águas superficiais têm pouco tempo para dissolver cimento de sílica, e as condições climáticas superficiais podem propiciar a formação de crostas duras que protegem a rocha em superfície. As rochas da subunidade Vila Velha e da Formação Furnas apresentam porções resistentes aos processos de intemperismo químico e físico, com baixa porosidade, sobrecrescimento sintaxial em grãos de quartzo (formando cimento sintaxial) e ocorrência de crostas rígidas superficiais compostas por sílica e óxidos de ferro. Considera-se então que a alteração química do quartzo está diretamente relacionada com duas possibilidades: a) intemperismo em profundidade, vinculado a longo tempo de ação e/ou; b) ação microbiológica.

A presença de micro-organismos, como bactérias e fungos, em amostras de rochas arenizadas e/ou fantomizadas, sugere a possibilidade de que esses organismos poderiam ter alterado as condições químicas em locais específicos da rocha, resultando em aumento do pH, situação ideal para a dissolução de quartzo, conforme indicado por Bennet (1991), Dove e Rimstidt (1994), Ehrlich (1996), Decho (2000), Büdel et al. (2004), Brehm, Gorbushina e Mottershead (2005) e Miot, Benzerara e Kappler (2014).

A dissolução da caulinita ocorre pela ação de ácidos orgânicos, principalmente o oxálico ($H_2C_2O_4$), produzido a partir da degradação de plantas. Mas também há outros fatores que podem influenciar, tais como temperatura, o movimento de percolação da água, cristalinidade do mineral, teor de alumínio e bactérias aeróbicas (Sutheimer, Maurice e Zhou, 1999; Metz e Ganor, 2001; Maurice et al., 2001; Cama, Metz e Ganor, 2002; Ganor e Lasaga, 2005; Cama e Ganor, 2006).

No caso da dissolução de óxidos de ferro, alguns autores atribuem à contribuição de sideróforos, compostos orgânicos elaborados por micro-organismos,

a solubilidade e a cinética de dissolução destes minerais (e.g. Hersman, Lloyd e Sposito, 1995; Hersman, 2000; Kraemer, 2004). Panias et al. (1996), Taxiarchou et al. (1997) e Lee et al. (2007) também relatam a possibilidade de dissolução do óxido de ferro por ácido oxálico.

Aubrecht et al. (2008), estudando metarenitos e quartzitos dos tepuis venezuelanos, salientaram que as feições cársticas desenvolvidas nestas rochas podem estar diretamente relacionadas com estratos e porções específicas com baixa ou nenhuma litificação. Assim, litificação não homogênea, onde determinadas porções e camadas das rochas apresentam diferença de cimentação, podem influenciar diretamente no processo de carstificação. Evidências de áreas com menor proporção de cimento foram identificadas para os quartzoarenitos da Formação Furnas (Lobato e Borghi, 2005) e subunidade Vila Velha (Bocardi, 2005). Entretanto, as amostras analisadas nesta pesquisa apresentaram boa cimentação mesodiagenética e registros consideráveis de dissolução, sobretudo dos cimentos.

Conclusões

Os quartzoarenitos da Formação Furnas e subunidade Vila Velha (Formação Campo Mourão) apresentam um conjunto expressivo de feições geológicas de origem cárstica associadas a processos de precipitação, intemperismo e erosão. A existência de mais de uma centena de cavernas, com drenagem subterrânea constituindo sumidouros e ressurgências, associadas com mais de duas centenas de depressões no terreno (dolinas) constituem expressivo patrimônio espeleológico. Espeleotemas, rochas arenizadas e fantomizadas e espeleogens, tais como canais de teto e parede, dutos de dissolução, cúpulas e alvéolos (*tafoni*), são impressões no substrato rochoso que registram processos vinculados a fenômenos de dissolução.

Estas feições geológicas de origem cárstica se associam principalmente a arenitos com textura média. As estruturas sedimentares e tectônicas desempenharam controle fundamental no seu desenvolvimento. As características litofaciológicas também contribuem para uma maior expressão das feições, mas não são fatores determinantes. Verificou-se que sua ocorrência está relacionada diretamente às descontinuidades físicas das rochas, que facilitam a circulação de

fluidos em zonas profundas, possibilitando a carstificação por arenização e fantomização, a abertura de vazios, dutos, galerias e cavernas.

Processos de arenização e fantomização foram atuantes nestes arenitos, uma vez que há registros de dissolução de diferentes tipos de cimento (caulinítico/óxidos de ferro/sobrecrescimento sintaxial de quartzo) e do arcabouço quartzoso. A fantomização é mais atuante, pois a dissolução dos cimentos caulinítico (para a Formação Furnas) e de óxidos de ferro/caulinítico (para o Arenito Vila Velha) prevalece em relação à alteração química verificada nos grãos e no sobrecrescimento de quartzo.

Rochas arenizadas e/ou fantomizadas nas duas unidades geológicas constituem importantes indícios para interpretação da gênese do carste da área a partir do modelo genético de primocarste. Interpreta-se a formação e evolução das formas atuais de relevo, subterrâneas e superficiais, com base neste modelo carstogenético. A criação de dutos e núcleos de dissolução em contexto freático e evolução destes na zona aerada teve como consequência a formação de depressões no terreno (dolinas) e cavernas. Os relevos ruiniformes desenvolvidos em rochas da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha são produtos desta carstificação subterrânea, que evoluíram e foram esculpidos posteriormente por processos de intemperismo químico e físico em superfície.

O modelo genético do primocarste permite entender o processo cárstico em rochas menos solúveis, como quartzoarenitos. Essa abordagem se contrapõe aos modelos clássicos da carstogênese, que consideram as feições geológicas de áreas desenvolvidas em rochas não carbonáticas como resultado de processos mecânicos, sem a participação do intemperismo químico, classificando estas paisagens como pseudocarste.

A ação de ácido oxálico e atividades microbiológicas são processos de fundamental importância na dissolução do arcabouço quartzoso e de cimentos dos arenitos (caulinita, óxido de ferro e sobrecrescimento sintaxial de quartzo). Os micro-organismos, visíveis em rochas arenizadas e/ou fantomizadas, produzem biofilmes que podem modificar condições de pH, tornando a água alcalina e gerando ambiente ideal para a dissolução do quartzo.

Os quartzoarenitos estudados apresentam estruturas e feições geológicas de propriedades típicas de carstificação hipogenética, indicando processos de subida de nível de água em contexto freático. Entretanto, o modelo carstogenético

da área é definido como primocarste, com a possibilidade de terem ocorrido processos hipogenéticos localizados.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos laboratórios de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar (LabESed) e de Análise de Minerais e Rochas (Lamir) e o Centro de Microscopia Eletrônica (CME), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), e Laboratório de Geologia Pesquisa e Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado (Processo de número 1554618) e ao Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE) por todo apoio em trabalhos de campo.

Referências

AHMADI, A.; MOGHIMI, E; ZAMANZADEH, S.M.; MOTAMED, R, 2015. **The Effect of Sandstone Composition on Distribution of Tafoni Landforms in the Aghajari Sandstone, Northwest of Masjed Soleyman, Iran**. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Geology. Volume 2015, p. 1-10.

AUBRECHT, R.; BREWER-CARÍAS, CH.; ŠMÍDA, B.; AUDY, M.; KOVÁČIK, L'. 2008. **Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela**. Sedimentary Geology 203. 181–195.

AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., SCHLÖGL, J., & AUDY, M., 2017. **Small-scale modelling of cementation by descending silica-bearing fluids: Explanation of the origin of arenitic caves in South American tepuis.** Geomorphology, 298, 107–117. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.010

ARAÚJO, T.P. **Sistema fluvial ou dominado por maré?: estudos de processo de sedimentação e arquitetura deposicional no Canyon do Guartelá, Formação Furnas, Devoniano Inferior, Bacia do Paraná, Brasil**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 2016.

ASSINE, M.L.; SOARES, P.C.; MILANI, E.J., 1994. **Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 24 (2): 77-89.

ASSINE, M.L. **Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, São Paulo. 1996.

ASSINE, M.L., 1999. **Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas, no flanco sudeste da bacia do Paraná**. Rev. Bras. Geociências, São Paulo. 29: 357-370

BASKAR, S.; BASKAR, R.; KAUSHIK A., 2007. **Evidences for microbial involvement in the genesis of speleothem carbonates**, Borra Caves, Visakhapatnam, India. Current Science, 92(3): 350-355.

BENNETT, P. C. 1991. **Quartz disolution in an organic-rich aqueous system**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 1781-1797

BERGAMASCHI, S. 1992. **Análise Sedimentológica da Formação Furnas na Faixa de Afloramentos do Flanco Norte do Arco Estrutural de Ponta Grossa, Bacia do Paraná**. 172p. (Dissertação de Mestrado. IG-UFRJ, Rio de Janeiro).

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. **Ação do intemperismo químico sobre as rochas.** In. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 2° ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. Cap. 3, p. 110 -190.

BOCARDI, L.B., 2005. **Petrologia e aspectos diagenéticos de arenitos reservatórios do Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano), Bacia do Paraná**. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 103p.

BORGHI, L.. 1993. **Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas (Prídoli Devoniano inferior) em afloramentos do bordo leste da bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

BREHM, U.; GORBUSHINA, A. A.; MOTTERSHEAD, D., 2005. **The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass**. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 219, 117–129.

BRUXELLES, L.; QUINIF, Y.; WIÉNIN, M. 2009. **How can ghost rocks help in karst development?** 15th International Congress of Speleology. 2009 ICS Proceedings, p. 814-819.

BÜDEL, B.; WEBER, B.; KÜHL, M.; PFANZ, H.; SÜLTEMEYER, D.; WESSELS, D., 2004. **Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes**. Geobiology, 2(4), 261-268.

CAMA, J.; METZ, V.; GANOR, J. 2002. **The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions.** Geochimica and Cosmochimica Acta 66(22): 3913–3926.

CAMA, J.; GANOR, J., 2006. **The effects of organic acids on the dissolution of silicate minerals: a case study of oxalate catalysis of kaolinite dissolution**. Geochim. Cosmochim. Acta 70, 2191e2209.

CAÑAVERAS, J. C.; SÁNCHEZ-MORAL, S.; SOLER, V.; SAIZ-JIMÉNEZ, C. 2001. **Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls**. Geomicrobiology Journal, 18: 223-240.

CANUTO, J.R.; ROCHA-CAMPOS, A.C.; SATO, P.E.S,. 1997. **The Late Paleozoic Lapa Sandstone (Itarare Subgroup): a possible tunnel-valley fill?**. Anais da Academia Brasileira de Ciências,69(2):275-276.

CRUZ, G.C.F., 2007. **Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais**. In.: Melo M. S. de, Moro R. S., Guimarães G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. Editora UEPG, 230 p.

DECHO, A., 2000. **Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms.** In: Riding, R., Awramik, S.M. (Eds.), Microbial Sediments. Springer, Berlin, pp. 9– 15.

DE ROS, L. F., 1998. **Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the Silurian-Devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, southern Brazil**. Sedimentary Geology, 116(1-2), 99-128.

DOVE, P. M.; RIMSTIDT, J. D. 1994. **Silica-water interaction**. Rev. Miner. 29, 259–308.

DUBOIS, C.; QUINIF, Y.; BAELE, J,-M.; BARRIQUAND, L.; BINI, A.; BRUXELLES, L.; DANDURAND, G.; HAVRONI, C.; KAUFMANN, O.; LANS, B.; MAIRE, R.; MARTIN, J.; RODET, J.; ROWBERRY, M.D.; TOGNINI, P.; VERGARI, A., 2014. **The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems**. Earth-Science Reviews 131, p. 116–148.

EHRLICH, H. L. 1996. **Geomicrobiology**. 3rd edition. Marcel Dekker, Inc., New York, 719 pp.

FLÜGEL FILHO, J.C., 2012. **Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa (PR): geodiversidade cárstica de um sistema subterrâneo e seus valores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

FRANÇA, A.B.; WINTER, W.R.; ASSINE, M.L. 1996. **Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canallobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências,26(1):43-56.

GALÁN, C.; HERRERA, F.; CARREÑO, R.; PÉREZ, M.A., 2004. **Roraima sur system, Venezuela: 10.8 km, world's longest Quartzite Cave**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 38: 53-60.

GANOR, J.; LASAGA, A. C., 2005. **The effects of oxalic acid on kaolinite dissolution rate**. Disponível em: http://www.bgu.ac.il/geol/ganor/papers/G_L_94/G&L94.html. Acessado em: 27/01/2018.

HÄUSELMANN, P.; TOGNINI, P., 2005. **Kaltbach Cave (Siebenhengste, Switzerland): phantom of the sandstone?** Acta Carsologica 34/2 5, Ljubljana, p. 383-396.

HARDT, R.; RODET, J.; PINTO, S.A.F. **O carste. Produto de uma evolução ou processo?** Evolução de um conceito. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, Set. 2010, p. 110-124.

HARDT, R. **Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias**. Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 2011. 224 p.

HERSMAN, L.; LLOYD, T.; SPOSITO, G., 1995. **Siderophore-promoted dissolution of hematite**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(16), 3327-3330.

HERSMAN, L.E., 2000. **The role of siderophores in iron oxide dissolution. In: Environmental microbe-metal interactions**. American Society of Microbiology, p. 145-157.

HILL, C.A.; FORTI, P., 1997. **Cave minerals of the world**. National Speleological Society, Huntsville.

JENNINGS, J.N. **Sandstone pseudokarst or karst?** In: Young, R. W.; Nanson,G. C. Aspects of Australian Sandstone Landscapes. Wollongong: Australian ans New Zealand Geomorphology Group Special Publication no.1. 1983.

KAUFMANN O.; BINI A.; TOGNINI P.; QUINIF Y., 1999. **Étude microscopique d'une altérite de type fantôme de roche**. Études de géographie physique. Travaux 1999 – Suppl. XXVIII, Cagep, Université de Provence 129-134.

KLIMCHOUK, A. B., 2007. **Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective**. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico. 106 pp.

KLIMCHOUK, A., 2009.**Principal features of hypogene speleogenesis. Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins**. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, p. 7-15.

KLIMCHOUK, A., 2017. **Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification**. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), p. 79-105. https://doi.org/10.1144/SP466.11

KRAEMER, S.M., 2004. **Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores**. Aquatic sciences, v. 66, n. 1, p. 3-18.

LAVERTY, M., 2012. **Preparing the ground – new mechanisms for karst and speleogenesis: 'altération', fantomisation and replacement**. Transactions of the British Cave Research Association. CAVE AND KARST SCIENCE, Vol.39, No.2, p. 72-76.

LEE, S.O.; TRAN, T.; JUNG, B.H.; KIM, S.J.; KIM, M. J., 2007. **Dissolution of iron oxide using oxalic acid**. Hydrometallurgy, v. 87, n. 3-4, p. 91-99.

LETENSKI, R.; GUIMARÃES, G.B.; PIEKARZ, G.F.; MELO, M.S., 2009. **Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução**. Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas, 2(1), p. 5-15.

LOBATO, G.; BORGHI, L., 2005. **Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em afloramentos da borda leste da Bacia do Paraná**. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, Salvador. Anais. Salvador: IBP, p.1-6.

MAACK, R., 1946. **Geologia e geografia da região de Vila Velha e considerações sobre a glaciação carbonífera do Brasil**. Curitiba, Arquivos do Museu Paranaense, v.5, 305p.

MAACK, R., 1956. **Fenômenos carstiformes de natureza climática e estrutural de arenitos do Estado do Paraná**. Arquivos de Biologia e Tecnologia 11: 151–162.

MARTINI, J.E.J., 1979. **Karst in black reef quartzite near kaapsehoop, eastern transvaal**. Ann. South Afr. Geol. Surv. 13. p. 115-128.

MARTINI, J.E.J., 1982. **Karst in Black Reef and Wollenberg Group Quartzite of the Eastern Transvaal Escarpment**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 10: 99-114.

MASSUQUETO, L.L., 2010. **O sistema cárstico do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa - PR): caracterização da geodiversidade e de seus valores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa. 81p.

MASSUQUETO, L. L., GUIMARÃES, G. B., & PONTES, H. S., 2011. **Geossítio do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa, PR, Brasil): relevante exemplo de sistema cárstico nos arenitos da Formação Furnas**. Espeleo-Tema: Campinas, SBE, 22(1), p. 099-110.

MAURICE, P. A.; VIERKORN, M. A.; HERSMAN, L. E.; FULGHUM, J. E.; FERRYMAN, A. 2001. **Enhancement of kaolinite dissolution by an aerobic Pseudomonas mendocina bacterium**. Geomicrobiology Journal 18(1): 21–35.

MELO, M.S.; COIMBRA, A.M., 1996. **Ruiniform relief in sandstones – the example of Vila Velha, Carboniferous of the Paraná Basin, Southern Brazil**. Barcelona, Acta Geológica Hispanica,31(4): 25-40.

MELO, M.S.; GIANNINI, P.C.F.; PESSENDA, L.C.R., 2000. **Gênese e evolução da Lagoa Dourada, Ponta Grossa, PR**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 21 (1/2), 17-31, p. 17-31.

MELO, M.S. 2006. **Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 145p.

MELO, M.S.; BOSETTI, E.P.; GODOY, L.C.; PILATTI, F., 2007. **Vila Velha, PR: Impressionante relevo ruiniforme.** In.: SCHOBBENHAUS, C. /CAMPOS, D.A. / QUEIROZ, E.T. / WINGE, M. / BERBERT-BORN, M.. Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. p. 269-277.

MELO, M.S.; GIANNINI, P.C.F., 2007. **Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 32, p. 2149- 2164.

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

MELO, M. S., 2013. **Perfurações de cupins e geomorfogênese em arenitos paleozoicos da região dos Campos Gerais do Paraná**. Quaternary and Environmental Geosciences. 04(1-2), p. 25-33.

MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; CHINELATTO, A.L.; GIANNINI, P.C.; PONTES, H.S.; CHINELATTO, A.C.A.; ATENCIO, D., 2015. **Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences 63 (2015) 20-35.

METZ, V.; GANOR, J. 2001. **Stirring effect on kaolinite dissolution rate**. Geochimica and Cosmochimica Acta 65(20): 3475–3490.

MILANI, É.J., FRANÇA A.B., SCHNEIDER R.L., 1994. **Bacia do Paraná**. Bol. Geoc. PETROBRÁS, 8:69-82.

MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B., 2007. **Bacia do Paraná**. IN: Cartas Estratigráficas - Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.

MIOT, J.; BENZERARA, K.; KAPPLER, A.. 2014. **Investigating Microbe-Mineral interactions: Recent Advances in X-Ray and Electron Microscopy and Redox-Sensitive Methods**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42: 271–89

PANIAS, D.; TAXIARCHOU, M.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A., 1996. **Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions**. Hydrometallurgy, v. 42, n. 2, p. 257-265,

PASINI, G.A., 2009. **terminological matter: paragenesis, antigravitative erosion or antigravitational erosion?** International Journal of Speleology 38 (2). Bologna (Italy), p. 129-138.

PAVAN, B.H., 2015. **Sistemas fluviais de grandes dimensões: uma reinterpretação da Formação Furnas no Cânion Guartelá-PR**. Trabalho de conclusão de curso de Geologia na Universidade Estadual de Campinas, 45p.

PONTES, H.S., 2010. **Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, Paraná. Exemplo de Relevo Cárstico na Formação Furnas**. Monografia (Graduação em Bacharelado em Geografia) – Setor de Ciências Exatas e Naturais. UEPG. 94p.

PONTES, H.S. 2014. **Espacialização de feições cársticas da Formação Furnas: ferramenta para gestão do território no Município de Ponta Grossa (PR)**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 163p.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., FOLTRAN A.C., PONTES F.S., GUIMARÃES G.B., MOCHIUTTI N.F.B., GUIMARÃES S.K., BURGARDT S., DO VALE T.F., FEITOSA N.M.N., 2018a. **Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais: Ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação**. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas - GUPE - Ponta Grossa. 61 p.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., FERNANDES L.A., FOLTRAN A.C., MELO M.S., MOREIRA J.C., 2018b. **Caves geodiversity evaluation as an instrument to the management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil**. Geoheritage, 10(1):1-11. https://doi.org/10.1007/s12371-018-0317-9

QUINIF, Y., 1999. **Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification**. Etudes de géographie physique, Travaux - Supplement 18. University of Provence, p. 159–164.

QUINIF, Y.; BRUXELLES. L. , 2011. **L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification 'Ghost rock' weathering: processes, evolution and implications for the karstification**. Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° 4, p.?.

QUINIF, Y.; BAELE, J., M.; DUBOIS, C.; HAVRON, C.; KAUFMANN, O.; VERGARI, A., 2014. **Fantômisation: un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistasie d'Erhard**. Geol. Belg. 17, p. 66–74.

RODET, J.. **Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies: le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansionnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France)**. C. R. Acad. Sci. III 322. 1996. 1039–1045.

RODET, J. **The primokarst, former stages of karstification, or how solution caves are born**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 58–65.

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

SALLSTEDT, T.; IVARSSON, M.; LUNDBERG, J.; SJÖBERG, R.; ROMANÍ, J.R.V., 2014. **Speleothem and biofilm formation in a granite/dolerite cave, Northern Sweden**. International Journal of Speleology, 43: 305-313. http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.7

SAURO, F.; CAPPELLETTI, M.; GHEZZI, D.; COLUMBU, A.; HONG, P. Y.; ZOWAWI, H. M.; CARBONE, C; PICCINI, L; VERGARA, F; ZANNONI, D; DE WAELE, J.. 2018. **Microbial diversity and biosignatures of amorphous silica deposits in orthoquartzite caves**. Scientific reports, 8(1), 17569. https://doi.org/10.1038/s41598-018-35532-y

SOARES, O. **Furnas dos Campos Gerais, Paraná**. Curitiba: Scientia et Labor, 1989. XVII, 82 p.

STAFFORD, K. W.; NANCE, R.; ROSALES-LAGARDE, L; BOSTON, P. J., 2008. **Epigene and Hypogene Gypsum Karst Manifestations of the Castile Formation: Eddy County, New Mexico and Culberson County, Texas, USA**. International Journal of Speleology. 37 (2). Bologna (Italy). p. 83-98.

SUCHÝ, V.; SÝKOROVÁ, I.; ZACHARIÁŠ, J.; FILIP, J.; MACHOVIČ, V.; LAPČÁK, L. 2017. **Hypogene features in sandstones: an example from Carboniferous basins of centralwestern Bohemia, Czech Republic**. In: KLIMCHOUK, A.,

PALMER, A., DE WAELE, J., AULER, A. & AUDRA, P. (eds) Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer International, Berlin, 313–328.

SUTHEIMER, S. H.; MAURICE, P. A.; ZHOU, Q. 1999. **Dissolution of well and poorly crystallized kaolinites: Al speciation and effects of surface characteristics**. American Mineralogist 84: 620–628.

TAXIARCHOU, M.; PANIAS, D.; DOUNI, I.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A., 1997. **Dissolution of hematite in acidic oxalate solutions**. Hydrometallurgy, v. 44, n. 3, p. 287-299.

THEODOROVICZ, A.; THEODOROVICZ, A.M.G.. **Geodiversidade: adequabilidades e limitações ao uso e ocupação**. In. SILVA, C.R.. Geodiversidade do Brasil. Conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, p. 205-264

VERGARI, A., QUINIF, Y. **Les paléokarsts du Hainaut.** Geodin. Acta 10, 1997. p. 175–187.

VESELY, F.F., 2011. **Sulcos de origem glacial em arenitos neocarboníferos do Parque Estadual de Vila Velha, sudeste do Paraná**. Geociências (São Paulo. Impresso), v. 30, p. 589-599.

WEBB, J.A.; FINLAYSON, B.L., 1984. **Allophane and opal speleothems from granite caves in south-east Queensland.** Australian Journal of Earth Science. 31: 341–349.

WRAY, R.A.L., 1999. **Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia**. Australian Journal of Earth Sciences, 46(4):623-632.

WRAY, R.A.L., 2009. **Phreatic drainage conduits within quartz sandstone: Evidence from the Jurassic Precipice Sandstone, Carnarvon Range, Queensland, Australia**. Geomorphology 110, p. 203–211.

WRAY, R.A.L., 2013. **Solutional weathering and karstic landscapes on quartz sandstones and quartzite**. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, Karst Geomorphology, p. 463–483.

WRAY, R.A.L.; SAURO, F., 2017. **An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites**. Earth-Science Reviews, v. 171, p. 520-557. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008

YOUNG, R.W.; WRAY, R.A.L.; YOUNG, A.R.M., 2009. **Sandstone Landforms**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 314p.

ZALÁN, P.V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J.C.D.J., VIEIRA, I.S., & ASTOLFI, M.A.M. (1987). **A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 17, 243.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A., 1990. **Bacia do Paraná**. In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. Origem e evolução de Bacias Sedimentares. 2. ed. Rio de Janeiro: Gávea. Cap. Bacia do Paraná. p. 135- 168.

ZEPEDA MENDOZA, M.L.; LUNDBERG, J.; IVARSSON, M.; CAMPOS, P.; NYLANDER, J.A.A.; SALLSTEDT, T.; DALEN, L., 2016. **Metagenomic Analysis from the Interior of a Speleothem in Tjuv-Ante's Cave**, Northern Sweden. PLoS ONE, 11(3): 1-23. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151577

2.4. A REGIÃO CÁRSTICA DOS CAMPOS GERAIS, PARANÁ/SÃO PAULO (BRASIL): REVISÃO DE CONCEITOS, POTENCIAL ESPELEOLÓGICO E POLÍTICAS PÚBLICAS DE GEOCONSERVAÇÃO

Henrique Simão Pontes, Luiz Alberto Fernandes, Mário Sérgio de Melo, Gilson Burigo Guimarães, Laís Luana Massuqueto

Resumo

A região cárstica dos Campos Gerais (RCCG), situada nos estados do Paraná e São Paulo, é considerada uma nova região cárstica brasileira. A área congrega várias cavernas e feições típicas de relevo cárstico, desenvolvido em rochas da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha (Grupo Itararé), compostas, sobretudo por quartzoarenitos. Os conceitos de região cárstica, província espeleológica e distrito espeleológico muitas vezes se confundem e até mesmo são utilizados como sinônimos, em vários estudos. Propõe-se aqui nova conceituação para estes termos visando seu uso na gestão de territórios, políticas públicas e geoconservação. Apresenta-se um algoritmo matemático para estabelecimento do potencial espeleológico estimado (PEE) de uma área, visando indicar parâmetros menos subjetivos sobre a possibilidade de existência de cavernas. O modo de cálculo proposto visa evitar parâmetros vagos, como a ausência ou baixo potencial de ocorrência de cavidades e rochas carbonáticas. Após tal revisão de conceitos, apresentação do PEE e registro da nova região cárstica, discute-se sobre as políticas públicas e procedimentos administrativos na esfera estadual e municipal, com foco de análise no distrito cárstico de Ponta Grossa (DCPG), área de maior concentração de cavernas da RCCG. Inúmeros problemas legais e em procedimentos administrativos foram detectados, apontando os riscos na proteção do patrimônio geológico da área analisada frente às várias atividades e empreendimentos de significativo potencial degradador. Ao final, discute-se sobre a gestão do território na região cárstica dos Campos Gerais, que devido às suas fragilidades ambientais, necessita controle diferenciado sobre o uso e ocupação do solo, orientados por instrumentos de gestão claros e concisos, adotando-se sempre o princípio da precaução.

Palavras-chave: carste não carbonático; quartzoarenitos; gestão do território; legislação; licenciamento ambiental espeleológico

Introdução

A conservação de cavernas e dos relevos cársticos no Brasil é regulada por um conjunto de decretos, leis e normativas que definem as formas de uso e gestão deste patrimônio. Contudo, a falta de adequada classificação das regiões cársticas não carbonáticas (no caso analisado, em quartzoarenitos), enquadramentos de potencialidade espeleológica em níveis baixos, desproporcional à real dimensão da ocorrência de cavernas de determinados territórios, e um conjunto de dispositivos legais com brechas e falhas, proporciona sérios riscos à proteção dos relevos cársticos e das feições superficiais e subterrâneas associadas.

As primeiras propostas metodológicas voltadas à identificação e espacialização das áreas cársticas brasileiras referem-se a rochas carbonáticas (calcários, dolomitos e seus correspondentes metamórficos). Pioneiros nesta discussão, Karmann e Sanchez (1979) propuseram uma classificação a partir de *províncias espeleológicas* e *distritos espeleológicos*.

Segundo os autores, *província espeleológica* é uma região pertencente à mesma unidade geológica, composta por rochas carbonáticas, onde ocorrem ações cársticas e agrupamentos de cavernas. Para aqueles autores, as províncias podem ser divididas em distritos, classificados como áreas de maior concentração espeleológica. Assim, a definição de província espeleológica está intrinsecamente relacionada à continuidade geológica e conjuntos de cavernas.

Karmann e Sanchez (1979) também apresentam o conceito de *região carbonática* proposto para designar áreas desenvolvidas em rochas carbonáticas, mas que apresentam baixa ocorrência de cavernas e/ou condições geológicas desfavoráveis para a formação de cavidades subterrâneas. Após cerca de uma década, Karmann e Sanchez (1988) indicaram oito principais *provinciais espeleológicas* para o desenvolvimento de cavernas no território nacional. Neste total, os autores incluíram duas províncias formadas em rochas não carbonáticas, denominadas Serra Geral e Rio Urubu Superior.

Para o estado do Paraná, Martins (1985) e Karmann e Sanchez (1988) propuseram a Província Serra Geral, correspondendo com uma estreita faixa de arenitos do Grupo São Bento, incluindo os estados de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Parellada (1989) definiu cinco *províncias espeleológicas* no

Paraná, três carbonáticas (grupos Açungui e Setuva; Formação Rio Bonito) e três não carbonáticas (Formação Furnas, grupos Itararé e São Bento).

Auler, Rubbioli e Brandi (2001) e Auler (2002) utilizaram o mapa geológico na escala de 1:2.500.000 para definir quatorze áreas cársticas no Brasil, todas desenvolvidas em rochas carbonáticas. Estes autores foram os primeiros a utilizar o conceito de *região cárstica*, por entenderem que cavernas são uma das variadas feições componentes de um relevo cárstico.

Spoladore (2005) adotou a classificação de Karmann e Sanchez (1979), utilizou os conceitos *província* e *distrito espeleológico*, adotou a proposta de Parellada (1989) referente às três *províncias espeleológicas* não carbonáticas (areníticas) no Paraná e as subdividiu em nove *distritos espeleológicos*.

No ano de 2009, o Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV), órgão ligado ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), apresentou nova classificação de escala nacional, baseando-se no conceito de *região cárstica* (CECAV, 2009). Este trabalho resultou no reconhecimento de dezenove *regiões cársticas* no Brasil.

Atualmente, a legislação espeleológica, as diretrizes para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro e a gestão das áreas cársticas e com ocorrência de cavernas são baseadas nas classificações propostas por CECAV (2009, 2018a). Como relatado, foram apresentados três conceitos: *região cárstica*, *província espeleológica* e *distrito espeleológico*. Para a gestão do território considera-se necessário uma revisão conceitual, a fim de definir parâmetros claros para identificação e definição destas áreas cársticas/espeleológicas. A falta de conceituação objetiva resulta na existência de lacunas na legislação e em instrumentos de gestão específicos que orientem os órgãos ambientais nas esferas federal, estadual e municipal.

A presente comunicação traz uma discussão teórica, propõe revisão dos conceitos de *região cárstica*, *província espeleológica* e *distrito espeleológico* e oferece contribuições sobre o método de identificação destas áreas no Brasil. Propõe também a definição da *região cárstica dos Campos Gerais*, assim como um método para quantificar sua potencialidade para ocorrência de cavernas, denominado *potencial espeleológico estimado* (PEE). Por fim, estabelecida a nova região cárstica, discute se as feições de origem cárstica desenvolvidas em rochas areníticas são consideradas nas políticas públicas e nos processos de licenciamento

ambiental, de maneira que garanta a geoconservação deste patrimônio e o uso adequado do Aquífero Furnas e prevenção de riscos geoambientais.

Métodos

Foram realizadas consultas a publicações científicas (livros, artigos, mapas, anais de eventos), principalmente de obras que tratam sobre a classificação da paisagem cárstica no Brasil e os conceitos de *região cárstica*, *província espeleológica* e *distrito espeleológico*.

A análise apresentada tem suporte em diversos estudos sobre as feições e processos cársticos desenvolvidos em quartzoarenitos da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha pertencente à Formação Campo Mourão (Grupo Itararé), na região dos Campos Gerais do Paraná e em pequena porção do estado de São Paulo. Com a análise das informações referentes ao registro de cavidades subterrâneas e o potencial para novas ocorrências de cavernas, a partir da revisão conceitual de região cárstica, província espeleológica e distrito espeleológico, definida nesta pesquisa, foi proposta uma estrutura sequencial para a classificação de *regiões cársticas* e *províncias espeleológicas* (figura 5.1).

Para elaboração do mapa da região cárstica dos Campos Gerais utilizou-se dados em formato *shapefile* das regiões cársticas brasileiras e áreas com potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas no Brasil, disponíveis pelo CECAV. O mapa foi elaborado em ambiente SIG – Sistemas de Informação Geográfica, por meio do programa de uso livre *QGIS 2.14.3*.

A avaliação do potencial espeleológico estimado (PEE) do distrito cárstico de Ponta Grossa e da região cárstica dos Campos Gerais foi feita a partir dos dados sobre o número total de cavernas conhecidas, área total classificada como de alto potencial espeleológico e a porcentagem de área explorada/prospectada (valor aproximado, obtido a partir de análise de imagens orbitais e registros de prospecção em trabalhos científicos e relatórios de campo).

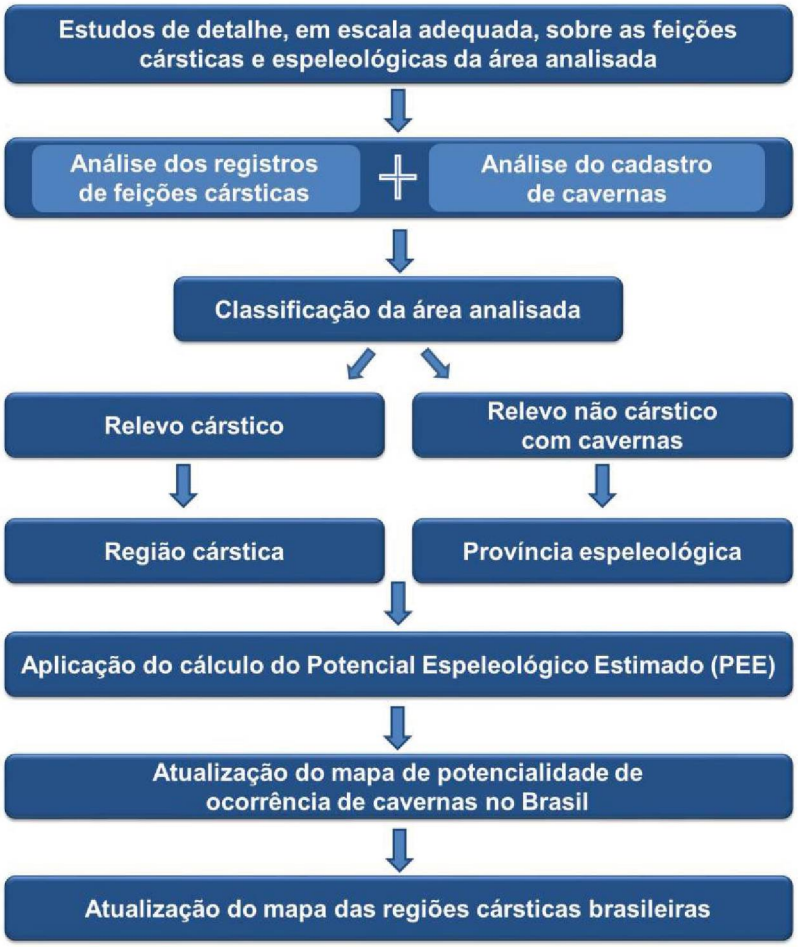


Figura 5.1: proposta de procedimentos operacionais para o reconhecimento e classificação de *região cárstica* e *província espeleológica* para o Brasil.

Para discutir políticas públicas e carste em área de substrato constituído por quartzoarenitos sem cimento carbonático, primeiramente foi realizada análise da ocorrência de levantamentos cárstico/espeleológicos em estudos ambientais para licenciamento de empreendimentos com alto potencial degradador. Esta etapa baseou-se em consultas a plataformas *online*, de processos de licenciamento ambiental disponíveis pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) de Ponta Grossa. Foram avaliados Estudos de Impactos Ambientais (EIA), Relatórios Ambientais Simplificados (RAS), Relatórios de Controle Ambiental (RCA), Estudos Prévio de Impactos Ambientais (EPIA) e demais estudos técnicos.

Um levantamento detalhado foi realizado na legislação municipal voltada para o controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico de Ponta Grossa. Para tanto, utilizou-se as plataformas digitais "leismunicipais.com.br" e "smma.pontagrossa.pr.gov.br/licenciamento/" para pesquisas de leis, decretos,

resoluções, decretos legislativos e instruções normativas. Palavras-chave foram aplicadas a fim de direcionar a busca ao tema foco, incluindo: *carste, cárstico, cárstica, carstológico, carstologia, pseudocarste, espeleologia, espeleológico, caverna, cavidade subterrânea, lapa, abrigo, gruta, furna, fenda, dolina, abismo, sumidouro, ressurgência, depressão, recalque, geologia, geológico, geodiversidade, geoforma, relevo, geomorfologia, geomorfológico, rocha, rochoso, feição/feições geológica (s), espeleotema, água subterrânea, aquífero, lençol freático, subsolo*. Após identificação dos dispositivos legais encontrados na busca inicial, um filtro foi aplicado, para identificar as leis que efetivamente tratam sobre o objeto desta pesquisa, para enfim efetuar a análise crítica destes instrumentos.

Proposta de revisão de conceitos

As *províncias* e *distritos espeleológicos* foram definidos conceitualmente por Karmann e Sanchez (1979). No entanto, como apontam Auler, Rubbioli e Brandi (2001) e Auler (2002) estes dois conceitos referem-se exclusivamente à existência de cavidades subterrâneas. Porém, geralmente, as cavernas fazem parte da paisagem cárstica, sendo apenas uma entre várias feições deste tipo de relevo, como depressões no terreno (dolinas), geoformas ruiniformes, sumidouros, ressurgências etc. Por este motivo, os autores preferiram utilizar o conceito *região cárstica*.

Todavia, os trabalhos que utilizam a expressão *região cárstica* não apresentam a definição do conceito. Esta falta gera ambiguidades na sua identificação e classificação.

A *região cárstica* deve ser antes de tudo, uma unidade de análise para a gestão do território onde ocorrem feições e processos geológicos específicos que exigem cuidados especiais e gestão diferenciada do uso e ocupação do solo. É uma área contígua, de grande extensão territorial, geograficamente delimitada a partir de características litoestratigráficas, composta por uma ou várias unidades geológicas carbonáticas ou não, constituídas por relevos cársticos. Nestas regiões ocorrem feições cársticas superficiais e subterrâneas, como cavernas, redes de drenagens criptorreicas, espeleotemas, espeleogens, relevos ruiniformes e outras geoformas de superfície (lapiás, bacias de dissolução, pináculos, alvéolos).

Áreas com alto potencial espeleológico, mas não classificadas como relevos cársticos, são situações comuns. Por exemplo, as inúmeras cavernas em rochas magmáticas da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis/SC) (MOCHIUTTI e TOMAZZOLI, 2017; SILVA, 2018). Neste contexto, em especial, o conceito de *região cárstica* não se aplica, por isso a revisão e adequação do conceito de *província espeleológica* faz-se necessária. Propõe-se que *província espeleológica* seja definida como uma área que inclui uma ou mais unidades geológicas, desenvolvida em relevo cárstico ou não, mas com ocorrência marcante de cavidades naturais subterrâneas, considerando a quantidade de registros.

Distritos espeleológicos são áreas de maior concentração de feições cársticas ou apenas cavernas, situadas dentro de uma *região cárstica* ou *província espeleológica*. São desenvolvidas em apenas uma unidade geológica, carbonática ou não. Os *distritos espeleológicos* ainda podem conter *núcleos* (*cársticos* ou *espeleológicos*), em situação que apresentem concentrações pontuais de cavernas em distritos pré-definidos (figura 5.2).

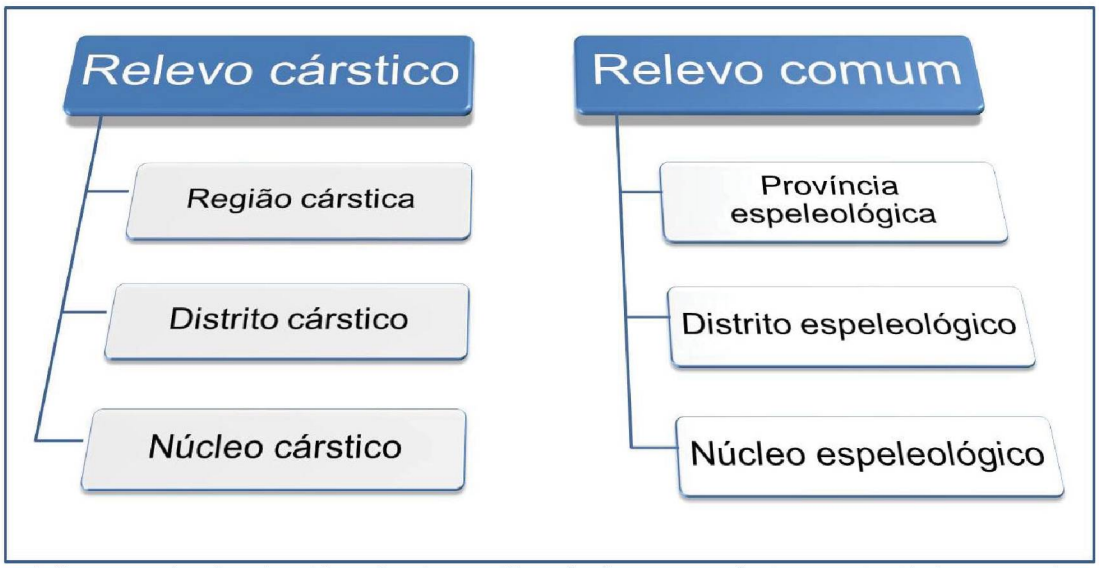


Figura 5.2: proposta de classificação de *região cárstica* e *província espeleológica,* com base na existência de relevo cárstico (carbonático ou não).

Estudo de caso: o carste não carbonático dos Campos Gerais

O município de Ponta Grossa, situado na região dos Campos Gerais do Paraná, tem dezenas de cavernas identificads (*e.g.* MAACK, 1956; MELO e GIANNINI, 2007; MELO et al., 2015; PONTES et al., 2018a; PONTES et al., 2018b).

Desenveram-se em quartzoarenitos da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha (Formação Campo Mourão, do Grupo Itararé). Nesta área há exemplos de sistemas subterrâneos com centenas de metros de desenvolvimento linear, além de grande potencial para novas descobertas espeleológicas.

Diversos estudos apresentaram evidências da atuação de processos de intemperismo químico nos quartzoarenitos, envolvendo dissolução do cimento e dos grãos de quartzo (*e.g.* MELO e GIANNINI, 2007; MELO et al., 2015; PONTES et al., 2018b). Há feições consideradas chave na classificação do relevo sustentado por arenitos quartzosos como cárstico, além das cavernas, depressões no terreno, espeleotemas, rochas arenizadas e fantomizadas, dutos de dissolução, cúpulas, canais de teto e parede (*half-tubes*) e alvéolos (*tafoni*) (PONTES et al., 2018b).

Ao analisar toda a área de afloramento destas unidades litoestratigráficas nos Campos Gerais do Paraná e pequena porção do estado de São Paulo, observa-se o registro contínuo de tais feições cársticas, como também de cavidades subterrâneas. Estas ocorrências sustentam a proposição de uma nova região cárstica brasileira, aqui denominada *região cárstica dos Campos Gerais*, por reunir duas unidades geológicas e por ser um nome de reconhecimento por parte da comunidade acadêmica e sociedade em geral em nível regional (figura 5.3).

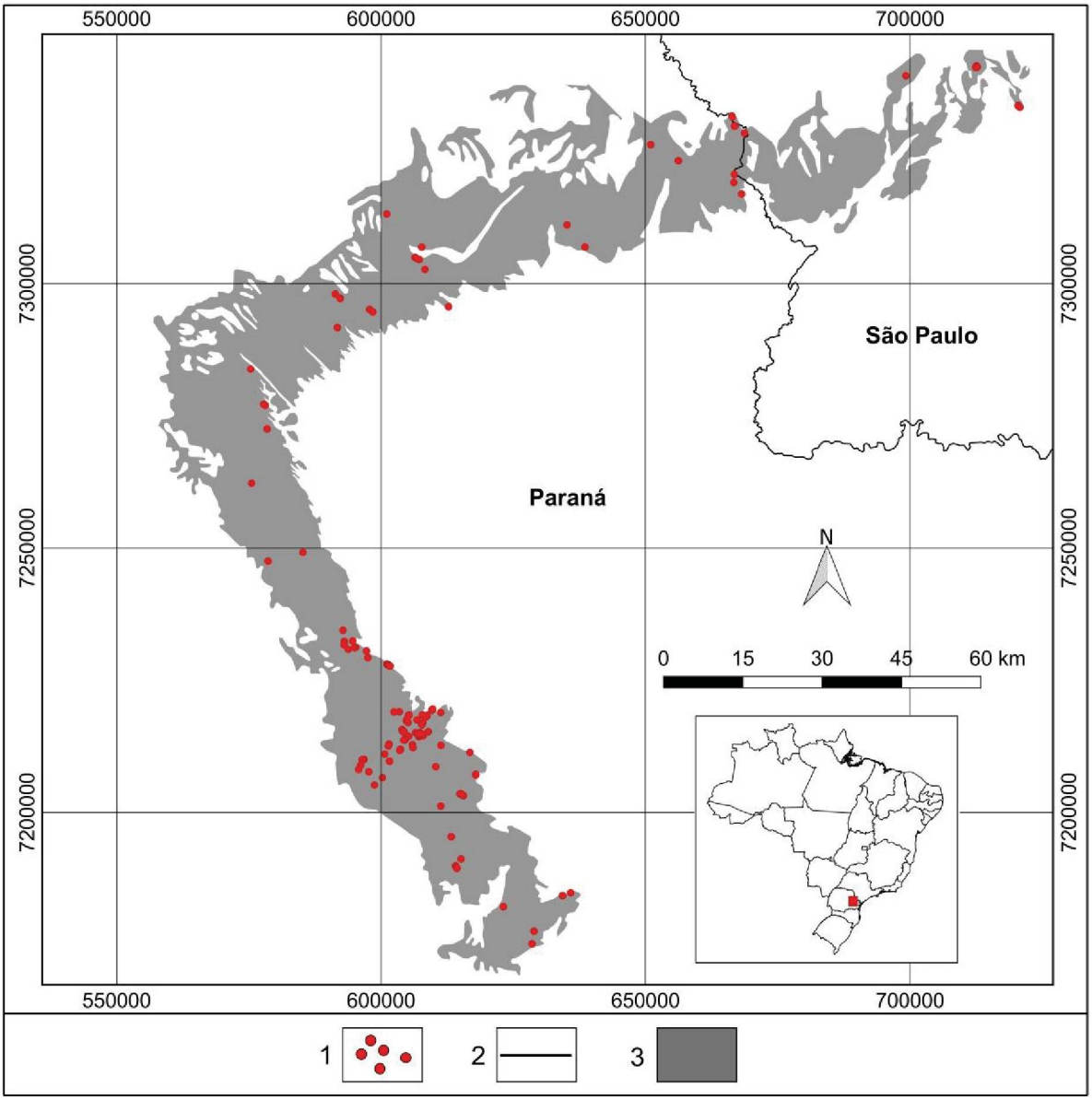


Figura 5.3: *Região cárstica dos Campos Gerais* e suas cavidades subterrâneas areníticas. Convenções cartográficas: 1- cavernas; 2- limite estadual; 3- limites da RCCG.

As áreas com potencial de ocorrência de cavidades subterrâneas e as regiões cársticas do Brasil: proposta de revisão

O Brasil possui dezenove *regiões cársticas* identificadas pelo Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV). Deste total, quatorze regiões se desenvolvem em rochas carbonáticas, três em rochas meta-siliciclásticas e duas em rochas ferríferas.

No entanto, novas regiões cársticas brasileiras podem ser identificadas, independente do litotipo associado, desde que *região cárstica* seja definida segundo o critério de ser um relevo cárstico, com ocorrência de feições geológicas típicas

formadas a partir de processos de intemperismo químico, ou seja, apresente processos de carstificação.

A ausência, baixo ou médio potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, classificação adotada por CECAV (2012) para definir o grau de potencialidade de ocorrência de cavernas, não podem ser características limitantes para classificar uma *região cárstica*, ou até mesmo uma *província espeleológica*. Devido à elevada extensão territorial brasileira e a pequena quantidade de grupos, profissionais e cientistas da espeleologia, várias áreas ainda não foram devidamente prospectadas e estudadas, a exemplo da região cárstica dos Campos Gerais.

Da mesma forma, a existência de rochas carbonáticas também não deve determinar o potencial de ocorrência de cavernas, muito menos ser considerado fator exclusivo para definir áreas cársticas, uma vez que há relevos desenvolvidos em rochas não carbonáticas que superam o número de cavidades registradas em relevos formados em litotipos carbonáticos. Como exemplo, no estado de Santa Catarina, o município com maior ocorrência espeleológica é Florianópolis, cavidades essencialmente formadas em rochas magmáticas (granito, diabásio, riolito e ignimbrito) (MOCHIUTTI e TOMAZZOLI, 2017; SILVA, 2018).

No ano de 2009, época da elaboração do mapa das regiões cársticas do Brasil (CECAV, 2009), o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) possuía seis mil cavidades subterrâneas cadastradas. No lançamento do mapa de potencialidade espeleológica, elaborado por Jansen, Cavalcanti e Lamblém (2012), havia 10.476 cavernas brasileiras cadastradas na base de dados do CECAV. Atualmente, de acordo com CANIE (2020) há 20.180 cavernas catalogadas no território nacional, ou seja, apenas 51,9% deste total de cavernas eram conhecidas na época da elaboração do mapa das regiões cársticas brasileiras. Este expressivo aumento no cadastro de cavidades subterrâneas reforça a necessidade de revisões e atualizações nas bases cartográficas das regiões cársticas e províncias espeleológicas brasileiras.

Distrito cárstico de Ponta Grossa e seu potencial espeleológico estimado (PEE)

O distrito cárstico de Ponta Grossa é composto por quartzoarenitos de cimento não carbonático. Possui 107 cavidades naturais subterrâneas, sendo 103

registros na Formação Furnas e quatro na subunidade Arenito Vila Velha (Grupo Itararé) (quadro 5.1) (figura 5.4).

As cavernas areníticas deste distrito cárstico podem apresentar centenas de metros de desenvolvimento linear, algumas formam importantes sistemas de drenagem subterrânea, possuem acentuada importância bioespeleológica e arqueológica. Recentes estudos revelaram grande concentração de cavernas neste distrito, que o permitem caracterizá-lo como o maior núcleo cárstico do Sul do Brasil, considerando-se o número de cavernas por metro quadrado. Denominado de sistema de cavernas Fenda Sem Fim, o distrito compreende 25 cavidades naturais subterrâneas, com perspectiva de novos registros espeleológicos.

Quadro 5.1: cavidades subterrâneas de Ponta Grossa, por unidade geológica.

Formação Furnas		Subunidade Vila Velha - Grupo Itararé	
1	Furna Gêmea 1	**55**	Abrigo do Campo Minado
2	Furna Gêmea 2	**56**	Gruta do Dengoso
3	Furna Grande	**57**	Gruta dos Três Níveis
4	Poço das Andorinhas	**58**	Gruta Deuzolivre
5	Abismo do Haras	**59**	Abrigo das Madeiras
6	Buraco do Padre	**60**	Abrigo do Sol
7	Furna do Bugio	**61**	Gruta da Rampa
8	Furna de Vila Velha 1	**62**	Gruta dos Opiliões
9	Furna de Vila Velha 2	**63**	Gruta de Cima dos Opiliões
10	Furna de Vila Velha 3	**64**	Toca do Remexido
11	Furna de Vila Velha 4	**65**	Gruta da Chente
12	Sumidouro do Rio Pitangui	**66**	Toca do Bicho I
13	Sumidouro do Córrego das Fendas	**67**	Toca do Bicho II
14	Sumidouro do Rio Quebra-Perna	**68**	Toca Mebati
15	Caverna da Chaminé	**69**	Toca do Corredor
16	Caverna do Opilião	**70**	Abrigo da Teima
17	Gruta da Inspirada	**71**	Toca do Teto Baixo
18	Caverna do Bugio	**72**	Abrigo do Bloco Isolado
19	Caverna das Andorinhas	**73**	Toca Slickenside
20	Gruta da Pedra Grande	**74**	Gruta Fim da Sem Fim
21	Fenda da Freira	**75**	Sumidouro do Guarda
22	Gruta Macarrão	**76**	Abismo Guabiroba I
23	Abismo Cercado Grande 1	**77**	Abismo Guabiroba II
24	Abismo Cercado Grande 2	**78**	Abismo Guabiroba III
25	Caverna do Zé	**79**	Fenda do Carlos
26	Gruta do Corujão	**80**	Toca do Setor
27	Gruta Cambiju 2	**81**	Gruta Passo da Natureza
28	Caverna dos Trezentos	**82**	Abismo Passo da Natureza
29	Fenda dos Tonini	**83**	Gruta da Águia
30	Lagoa Dourada	**84**	Gruta do Vespaziano

31	Lagoa Tarumã	**85**	Toca da Pamonha
32	Fenda Sem Fim	**86**	Abrigo Sumidouro I
33	Abismo da Brisa	**87**	Abrigo Sumidouro II
34	Fenda Guacharos	**88**	Abrigo Cambiju
35	Sumidouro da Mariquinha	**89**	Abrigo do Trono
36	Abismo Cercado Grande 3	**90**	Abrigo Pitangui
37	Poço de Santa Madalena	**91**	Abrigo Usina São Jorge
38	Gruta Mãe da Divina Graça	**92**	Toca do Morcego
39	Fenda do Mosteiro	**93**	Abrigo Pitangui II
40	Fenda Santa Maria I	**94**	Abrigo do Vale dos Escoteiros
41	Fenda Santa Maria II	**95**	Abrigo Macarrão I
42	Furna do Anfiteatro	**96**	Abrigo Macarrão II
43	Gruta Nova Holanda	**97**	Fenda do Rancho Catavento
44	Abismo da Bromélia	**98**	Caverna do Dragão
45	Dolina do Matador	**99**	Abrigo Morro do Castelo
46	Gruta da Ricota I	**100**	Abrigo Meia Lua
47	Gruta da Ricota II	**101**	Fenda dos Dutos
48	Toca do Golpe	**102**	Sumidouro do Rio Cercado Grande
49	Toca do Beco Diagonal	**103**	Abismo da Chuva
50	Gruta de Ponta Cabeça	**104**	Gruta Cambiju 1
51	Fenda Pulo do Gato	**105**	Gruta da Fortaleza
52	Abismo do Ferla	**106**	Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa
53	Toca da Catinga	**107**	Gruta do Araújo
54	Fenda do Morcego		

Mais de um quarto do município de Ponta Grossa possui alto potencial para a ocorrência de cavidades subterrâneas em rochas areníticas quartzosas (tabela 5.1). No entanto, em apenas 16,2% do total da área com potencialidade elevada foi realizada exploração espeleológica de detalhe.

Tabela 5.1: área do *distrito cárstico de Ponta Grossa* e relação com as porções exploradas, valores por unidade geológica e total.

Unidade geológica	Área (ha) com alto potencial espeleológico	Área explorada aproximada (ha)	Área explorada (% aproximada)
Arenito Vila Velha	6.449	2.235	34,6
Formação Furnas	56600	8.019	14,1
Área total	**63.049**	**10.254**	**16,2**

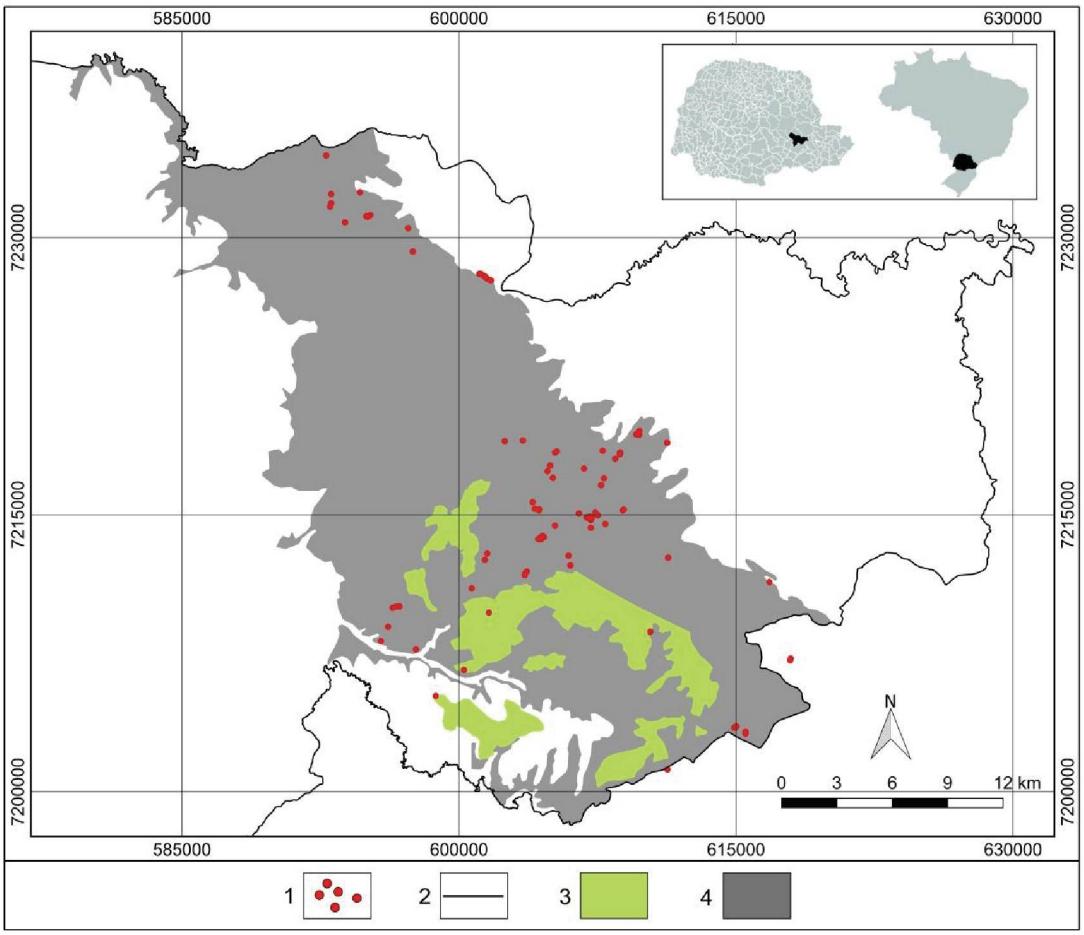


Figura 5.4: distribuição das cavidades subterrâneas areníticas do *distrito cárstico de Ponta Grossa*. Convenções cartográficas: 1- cavernas; 2- limite do município de Ponta Grossa; 3- Grupo Itararé (área de ocorrência do Arenito Vila Velha); 4- Formação Furnas.

Piló & Auler (2009) e Jansen, Cavalcanti & Lamblém (2012), propuseram a estimativa geral do potencial espeleológico a partir da quantidade conhecida de cavernas. No entanto, os autores não expuseram métodos de cálculo matemático para as estimativas. Recentemente, Auler (2019) apresentou uma estimativa do potencial espeleológico brasileiro em rochas carbonáticas, siliciclásticas e ferríferas, com base no número de cavernas conhecidas, área total de afloramentos, densidades (mínima, média e máxima) de ocorrência de cavidades, área total prospectada e percentual de afloramento. Com o objetivo de se obter um valor numérico para o potencial espeleológico do distrito cárstico arenítico de Ponta Grossa, propõe-se aqui um algoritmo para o cálculo do potencial espeleológico estimado (PEE).

O método de cálculo utiliza a relação entre o número de cavernas conhecidas (feita separadamente, avaliando por unidade geológica ou de modo agrupado), e a área total classificada como de alto potencial espeleológico (área

total de afloramentos rochosos, podendo ser realizada baseando-se nas compartimentações região/província, distrito ou núcleo) e a porcentagem de área explorada (área conhecida até o momento, onde foi realizada prospecção espeleológica). Assim, propõe-se a seguinte equação, que aplicada ao *distrito cárstico de Ponta Grossa*, gerou os resultados apresentados na tabela 5.2:

$$PEE = \frac{100\ x\ CAVc}{\%PEexp}$$

Onde:

PEE = potencial espeleológico estimado

CAVc = quantidade de cavernas conhecidas

PEexp = porcentagem da área total explorada em relação a área total com potencial espeleológico

Tabela 5.2: potencial espeleológico estimado do *distrito cárstico de Ponta Grossa*, por unidade geológica.

Unidade geológica	N° de cavidades conhecidas	Possível PEE (cavidades não conhecidas)
Arenito Vila Velha	4	> 11
Formação Furnas	103	> 730
Total	**107**	**> 741**

Em relação aos valores atribuídos à área com potencial espeleológico e área total explorada, pode ser adotado qualquer padrão de medida (hectares, quilômetros quadrados, metros quadrados etc.). Contudo, para identificar ***PEexp*** (porcentagem da área total explorada em relação a área total com potencial espeleológico) o padrão de medida desses valores deve ser o mesmo.

Sem o número de cavernas conhecidas e sem o valor (ao menos aproximado) do quanto (em porcentagem) foi explorada/prospectada a área em análise, não é possível determinar o PEE. Da mesma forma, a combinação de baixa ocorrência de cavidades e pouca área explorada pode gerar valores incompatíveis com a realidade. Uma área com potencial espeleológico não necessariamente contém muitas cavernas. Por isso, informações qualitativas são necessárias, uma

vez que, por exemplo, determinadas condicionantes geológicas (grau elevado de metamorfismo, relevo ou ausência de estruturas tectônicas/permeabilidade por fratura) podem ser fatores decisivos para a ausência ou raridade de cavernas.

O Arenito Vila Velha tem ocorrência restrita ao distrito cárstico de Ponta Grossa. Por outro lado, a Formação Furnas compõe praticamente toda a região cárstica dos Campos Gerais e tem apresentado alto potencial espeleológico. A escassez de informações ainda existente em áreas sobre estas rochas nesta região cárstica permite supor que ainda há inúmeras cavidades subterrâneas não conhecidas. Ao estender os cálculos do potencial espeleológico estimado (PEE) para toda a região cárstica dos Campos Gerais o resultado mostra um potencial para a existência de mais de 7,7 mil cavernas, conforme apresenta a tabela 5.3.

Tabela 5.3: potencial espeleológico estimado da região cárstica dos Campos Gerais.

Área (ha) com alto potencial espeleológico	Área explorada aproximada (ha)	Área explorada (% aproximada)	N° de cavidades conhecidas	Possível PEE (cavidades não conhecidas)
465.005,67	**10.368**	**2,22**	**170**	**> 7727**

Carste em áreas de rochas não carbonáticas e políticas públicas

A geoconservação de áreas cársticas no Brasil é um desafio de décadas. A Constituição Federal de 1988 e o Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990 (BRASIL, 1988; 1990), são considerados marcos fundamentais para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro. Contudo, o Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008 (BRASIL, 2008), modificou toda a referência de proteção das cavernas no território nacional. Antes do Decreto nº 6.640/2008, qualquer cavidade natural subterrânea não poderia ser suprimida ou ser submetida a impactos negativos irreversíveis devido a um empreendimento ou atividade qualquer. Após este marco legal de 2008 as cavernas perderam o *status* de totalmente protegidas, e passaram para uma situação de até possível supressão total, destes bens da União.

Atualmente, o processo de licenciamento espeleológico e a determinação do grau de relevância das cavernas são definidos pela Instrução Normativa MMA nº 02, de 30 de agosto de 2017 (MMA, 2017). Cavernas classificadas como de máxima relevância, teoricamente, não podem ser suprimidas. As definidas como de alta relevância podem ser totalmente destruídas, desde que ocorra compensação

espeleológica, e outras duas cavidades de alta relevância devem ser protegidas. As qualificadas como de média e baixa relevância podem ser eliminadas sem a necessidade de nenhum tipo de compensação ambiental.

Entretanto, os principais dispositivos legais que tratam sobre as cavidades subterrâneas não deixam claro que para o licenciamento de todo e qualquer empreendimento e atividade que possa causar dano ao patrimônio cárstico e espeleológico, deve ser realizada exploração e prospecção espeleológica adequada, conforme método apontado por Moura (2013). Segundo o autor, os levantamentos devem envolver avaliação prévia do potencial espeleológico, determinação da densidade da malha de prospecção e percentual amostral a ser atingido em cada área. Em campo, a exploração deve ter como objetivo identificar feições cársticas superficiais e subterrâneas, incluindo cavernas, dolinas, sumidouros, ressurgências, afloramentos com formas ruiniformes diversas, entre outras. Todo o caminhamento durante o trabalho de exploração deve ser registrado com GPS (*Global Position System*) e salvo em arquivos GPX (*GPS Exchange Format*), como prova do efetivo trabalho de campo segundo os parâmetros adotados no método de prospecção. Contudo, o que comumente se faz nos estudos de licenciamento ambiental reduz-se apenas a consulta da existência ou não de registro de cavernas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Trabalhos de campo para a investigação de novas cavidades não são executados.

Nenhuma legislação recomenda ou indica uma base cartográfica de referência para a identificação de áreas com ocorrência de cavernas, de potencial para o desenvolvimento de outras feições cársticas, das regiões cársticas, das províncias espeleológicas e seus distritos e núcleos. Mesmo havendo mapas com estes temas, apresentados pelo CECAV, não são documentos anexos ou reconhecidos por leis, ou seja, não possuem valor jurídico.

As regiões cársticas são compostas não somente por cavernas, mas também por um conjunto de feições geológicas. E a legislação ambiental em vigor não é abrangente o suficiente para prever legalmente estas outras feições geológicas de origem cárstica, além das cavidades. Quando se trata de feições cársticas em áreas não carbonáticas, como exemplo, em quartzoarenitos, a legislação torna-se mais ineficiente, não reconhecendo a própria existência de processos cársticos nestes tipos de relevo, ou deixando brandas as restrições e exigências. Conforme CECAV (2012), o mapa de potencialidade de ocorrência de

cavernas no Brasil aponta que a região cárstica dos Campos Gerais possui médio potencial espeleológico, contrapondo-se ao fato de Ponta Grossa ser o município que mais possui cavernas no Sul do país e o potencial espeleológico estimado desta região apontar para a possibilidade da existência de mais sete mil cavernas.

O Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008, no § 3º de seu Art. 14 (BRASIL, 2008), usa a palavra "*pseudocarste*" para se referir a relevo que congrega dolinas, sumidouros, ressurgências, vales cegos, lapiás e cavernas. Este termo foi outrora utilizado no meio acadêmico, mas na atualidade é considerado ultrapassado e causa mais ambiguidade do que efetivamente esclarece sobre os processos cársticos e suas formas e feições de relevo em rochas carbonáticas e não carbonáticas. A carstificação da rocha pode ocorrer em rochas sem nenhum componente carbonático, de maneira que o relevo desenvolvido nestas podem ser classificados como cársticos.

As lacunas existentes na legislação nacional acerca das áreas cársticas não carbonáticas e suas feições geológicas têm reflexo nos procedimentos administrativos de órgãos ambientais estaduais e municipais, assim como nos processos de licenciamento ambiental. Como destacado por Pontes e Massuqueto (2016), o Instituto Ambiental do Paraná (IAP) não exige levantamentos espeleológicos de detalhe para a instalação de empreendimentos que causam significativo impacto ambiental, sobretudo em áreas com ausência de rochas carbonáticas, como a região cárstica abordada nesta pesquisa. Os autores vão adiante e salientam que a prática adotada pelo referido instituto é apenas exigir que o empreendedor indique ou não a ocorrência de cavidades subterrâneas, sem nenhum laudo, parecer ou relatório de profissional especializado.

Ao analisar os processos de licenciamento ambiental do IAP verifica-se que grandes empreendimentos e atividades geradoras de impactos diretos à região cárstica dos Campos Gerais não apresentaram estudos suficientes, nem utilização de métodos adequados, envolvendo prospecção e caracterização cárstica/espeleológica. Há situações em que não há palavras relacionadas ao tema (por exemplo: cavernas, cavidades, espeleologia, carste) nos documentos, o que demonstra a total exclusão do assunto nestes estudos.

O quadro 5.2 apresenta os estudos ambientais de empreendimentos a serem, ou já instalados, na região cárstica dos Campos Gerais, em situação inadequada, conforme comentado.

Quadro 5.2: análise da ausência de levantamentos cárstico/espeleológicos em estudos ambientais para licenciamento de empreendimentos com alto potencial degradador na região cárstica dos Campos Gerais.

Empreendimento	Município	Levantamentos cárstico/espeleológicos realizados	Documento de referência
UHE de Telêmaco Borba	Tibagi	Apenas consulta ao CANIE	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - SOMA (2011)
PCH Castro	Castro	Nenhum	EPIA - Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EPIA) - IGPLAN (2010)
PCH Fortaleza	Tibagi	Nenhum	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - AMÜLLER (2014)
UHE Santa Branca	Tibagi e Carambeí	Apenas consulta ao CANIE	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – TITANIUM (2015)
UHE Tibagi Montante	Tibagi	Consulta ao mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – SOMA (2013)
Parque Eólico Batavo	Carambeí	Apenas consulta ao CANIE	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - Biometria (2015)
Complexo Eólico-Elétrico Campos Gerais	Tibagi	Nenhum	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - LACTEC (2014)
Linha de Transmissão de Energia 525 kV Ponta Grossa – Bateias (C1 e C2)	Castro, Carambeí e Tibagi	Nenhum	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - GEOCONSULTORES (2018)
Lavra e beneficiamento de Areia Quartzosa	Ponta Grossa	Estudo espeleológico parcial, com prospecção incompleta	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) - GEOPLANEJAMENTO (2016)
CGH São João	Carambeí	Apenas consulta ao CANIE	Relatório Ambiental Simplificado (RAS) - RECITECH (2016)
CGH Rio do Salto e LT	Palmeira	Apenas consultas ao CANIE e ao mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil	Relatório Ambiental Simplificado (RAS) - CIA AMBIENTAL (2017)
PCH Beira Rio	Jaguariaíva e Sengés	Nenhum	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – AMÜLLER (2016)
PCH Macacos	Jaguariaíva e Sengés	Nenhum	Relatório Ambiental Simplificado (RAS) - AMÜLLER (2016)
Linha de Transmissão LT 23KV Figueira/ Ponta Grossa	Tibagi, Castro, Carambeí e Ponta Grossa	Nenhum	Relatório Ambiental Simplificado (RAS) - IG TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO (2015)
Trecho de LT entre a subestação Castro Norte e o seccionamento da LT 230 KV Klacel -	Castro	Apenas consulta ao CANIE	Relatório Ambiental Simplificado (RAS) - AMBIOTECH (2018)

Ponta Grossa Norte			
Central de Tratamento de Resíduos Furnas (CTR/Furnas)	Ponta Grossa	Nenhum	Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – RESITEC (2007)

Salienta-se que foi identificado o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de apenas um empreendimento de mineração na plataforma *online* do IAP. Contudo, consultas realizadas ao Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), informações disponíveis pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), mostram que há oito processos em fase de concessão de lavra de areia por desmonte mecânico de rocha arenítica na região cárstica dos Campos Gerais.

Desde o ano de 2013, há um processo de descentralização do licenciamento ambiental no estado do Paraná. Tal modificação foi estabelecida na tentativa de diminuir a elevada demanda existente sobre o Instituto Ambiental do Paraná (IAP), que mesmo com um quadro de servidores defasado em relação ao número de técnicos e capacidade de processamento, recebe alta quantidade de pedidos de licenças ambientais. Assim, o Conselho Estadual de Meio Ambiente do Paraná (CEMA) publicou a Resolução CEMA nº 088, de 27 de agosto de 2013, que "*estabelece critérios, procedimentos e tipologias para o licenciamento ambiental municipal de atividades, obras e empreendimentos que causem ou possam causar impacto de âmbito local*" (CEMA, 2013). Esta resolução possibilita que o licenciamento ambiental passe a ser administrado por instâncias municipais, por órgão municipal capacitado e com estrutura física básica, necessária para o bom desenvolvimento dos trabalhos. Porém, nem sempre este requisito é atendido, a exemplo do município de Ponta Grossa, que utilizou recursos do Fundo Municipal de Defesa do Meio Ambiente (FUNDAM) para equipar e estruturar a Secretaria Municipal de Meio Ambiente, mesmo não havendo disposição em lei autorizando tal ação.

Em Ponta Grossa, a Lei 12.345, de 20 de novembro de 2015, instituiu o Sistema Municipal de Licenciamento e Fiscalização Ambiental, atribuindo à Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) a competência do licenciamento ambiental dos empreendimentos do município (PMPG, 2015d). Mediante análise da legislação municipal foi identificado um conjunto de 16 dispositivos legais de controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico de Ponta Grossa, conforme apresentados no quadro 5.3.

Quadro 5.3: legislação de Ponta Grossa que trata, de maneira direta ou indireta, do controle do uso e proteção do patrimônio geológico cárstico municipal.

Dispositivo legal	Finalidade
Decreto nº 13.957/2018 (PMPG, 2018a)	Define como competência da Secretaria Municipal de Meio Ambiente o monitoramento do subsolo
IN SMMA n° 1-001/2017 (SMMA, 2017a)	Define estudos específicos para o licenciamento ambiental de extração mineral em áreas cársticas com ocorrência de cavernas
IN SMMA n° 1-002/2017 (SMMA, 2017b)	Define estudos específicos para o licenciamento ambiental de – Extração de Pedras Irregulares de Modo Artesanal em áreas cársticas com ocorrência de cavernas
IN SMMA n° 2-001/2017 (SMMA, 2017c)	Estabelece que atividade de suinicultura não pode se situar em áreas com afloramentos rochosos e com afloramento do lençol freático
IN SMMA n° 10-001/2017 (SMMA, 2017d)	Estabelece laudo geológico para o licenciamento ambiental de loteamentos
IN SMMA n° 10-002A/2017 (SMMA, 2017e)	Estabelece a caracterização geológica no licenciamento ambiental de implantação de conjuntos habitacionais
Decreto nº 10.996/2016 (PMPG, 2016)	Regulamenta o licenciamento ambiental municipal, exigindo EIA/RIMA para empreendimentos que apresentem risco ao patrimônio espeleológico e geológico
Lei nº 12.128/2015 (PMPG, 2015a)	Cita de maneira equivocada que a captação de água subterrânea no aquífero "*karst*" não se enquadra como atividade de potencial poluidor
Lei nº 12.192/2015 (PMPG, 2015b)	Inclui o conceito de geodiversidade na política do ecoturismo e do turismo sustentável na cidade de Ponta Grossa
Lei nº 12.342/2015 (PMPG, 2015c)	Considera de interesse municipal as águas subterrâneas
Decreto nº 8.060/2013 (PMPG, 2013)	Estabelece a mesma competência ao COMDEMA apresentada na Lei nº 11.233/2012
Lei nº 11.233/2012 (PMPG, 2012)	Estabelece que uma das competências do Conselho Municipal de Meio Ambiente (COMDEMA) é propor a criação de unidade de conservação para proteção de sítios espeleológicos
Lei nº 10.417/2010 (PMPG, 2010)	Dispõe que lençóis a água subterrânea deverão distar, no mínimo, 2,00m, do ponto mais profundo utilizado para covas ou jazigos em cemitérios
Lei nº 8.473/2006 (PMPG, 2006)	Aponta a possível exigência de laudo geológico para licenciamento na Área de Proteção Ambiental da Floresta de Araucária do Município de Ponta Grossa – APA
Decreto nº 568/2005 (PMPG, 2005)	Estabelece a mesma competência ao COMDEMA apresentada na Lei nº 11.233/2012
Lei nº 7.636/2004 (PMPG, 2004)	Estabelece a mesma competência ao COMDEMA apresentada na Lei nº 11.233/2012

Dentre as 40 atividades que o município de Ponta Grossa tem competência para realizar o licenciamento ambiental, quinze são consideradas passíveis de gerar impactos negativos ao patrimônio geológico cárstico, sendo: 1) cascalheira; 2) extração de pedras irregulares de modo artesanal; 3) supressão de exóticas em

Área de Preservação Permanente (APP); 4) loteamentos; 5) implantação de conjuntos habitacionais; 6) postos de combustíveis e retalhistas de combustíveis; 7) tratamento e disposição final de resíduos da construção civil; 8) coletor tronco e rede coletora de esgoto; 9) unidade de tratamento de esgoto; 10) conservação, manutenção e restauração de estrada municipal; 11) terraplanagem; 12) atividades industriais; 13) suinocultura; 14) avicultura e; 15) piscicultura. Apenas duas exigem estudos cársticos e espeleológicos, cascalheira e extração de pedras irregulares de modo artesanal. Contudo, as normativas que regulamentam estas atividades não definem com clareza o que são consideradas áreas cársticas com ocorrência de cavernas no município. Da mesma forma, não são exigidos estudos de exploração e prospecção de detalhe, conforme método proposto por Moura (2013).

O Decreto municipal nº 14.085, de 20 de fevereiro de 2018, que dispõe sobre infrações ao meio ambiente e estabelece os procedimentos administrativos para apuração destas infrações (PMPG, 2018b), não exige detalhamento, envolvendo dimensionamento e método de cálculo, das infrações cometidas contra o patrimônio geológico como um todo, incluindo as feições cársticas e espeleológicas. A falta de controle agrava-se quando se considera que os processos de licenciamento ambiental do município de Ponta Grossa não ficam disponíveis para consulta pública na plataforma *online*, procedimento que contraria o princípio da transparência.

Assim, somando-se com as lacunas existentes no conjunto de leis ambientais municipal, também não são de conhecimento público os detalhes sobre os empreendimentos e atividades licenciadas em Ponta Grossa (tipo, localização, tamanho), nem os estudos ambientais elaborados para o licenciamento, tornando-se difícil o controle, fiscalização e proteção do patrimônio cárstico e espeleológico no distrito de maior destaque da região cárstica dos Campos Gerais.

Gestão do território da região cárstica dos Campos Gerais

Segundo Jansen, Cavalcanti e Lamblém (2012) o mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas do Brasil, na escala 1:2.500.000, constitui-se em importante ferramenta para orientar pesquisas técnico-científicas. Entretanto, este material, em conjunto com o mapa das regiões cársticas, tem como função principal auxiliar os órgãos de fiscalização e licenciamento ambiental, bem como a gestão e políticas

públicas voltadas à conservação da geodiversidade, especialmente do patrimônio cárstico e espeleológico nacional.

Uma região cárstica apresenta fragilidades ambientais que exigem gestão diferenciada do território, a fim de evitar acidentes geoambientais e proteger o patrimônio geológico. Nestas condições, as feições de origem cárstica desenvolvidas nos quartzoarenitos da Formação Furnas e subunidade Vila Velha precisam ser consideradas nas políticas públicas e nos procedimentos administrativos de gestão ambiental, buscando garantir a geoconservação.

Neste sentido, os processos de licenciamento ambiental de atividades e empreendimentos diversos, devem se nortear pelo princípio da precaução e o uso e ocupação do solo devem ser orientados em instrumentos de gestão específicos, como zoneamentos ambientais cársticos e zoneamentos espeleológicos. Instrumentos de gestão consolidados também devem incluir as características das regiões cársticas, como planos diretores municipais, planos de gestão de bacias hidrográficas, lei de zoneamento urbano e de uso e ocupação das áreas rurais, planos de manejo de unidades de conservação, entre outros.

Recente diagnóstico do CECAV (2018b) considerou toda a área de afloramento da Formação Furnas e do Arenito Vila Velha (subunidade da Formação Campo Mourão), no distrito cárstico de Ponta Grossa, como prioritária para a conservação do patrimônio espeleológico. Além disso, a área foi classificada na *categoria 1*, demandando principalmente ações voltadas para a criação ou ampliação de unidades de conservação, fiscalização e monitoramento e educação ambiental e patrimonial.

Esta classificação baseou-se exclusivamente na ocorrência concentrada de cavidades subterrâneas neste distrito cárstico. Contudo, conforme já apontado, esta situação se deve à existência e atuação de um grupo de espeleologia, espeleólogos e pesquisadores nesta área. Há outras porções da região cárstica dos Campos Gerais que ainda não foram devidamente exploradas.

Da mesma forma, os estudos de prospecção e levantamentos espeleológicos devem ser exigências obrigatórias e indispensáveis para o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades com potencial lesividade ao patrimônio geológico cárstico. Segundo o § 2º do Art. 19 do Decreto nº 6.640/2008, o empreendedor que requerer licenciamento ambiental deverá realizar previamente o cadastramento das cavidades subterrâneas mencionadas no

processo de licenciamento no CANIE. Estes dois condicionamentos resultam no aumento do conhecimento acerca do patrimônio espeleológico nacional. Notável exemplo desta situação é a região cárstica não carbonática da Formação Carajás, que após estudos de licenciamento espeleológico para mineração de ferro, foram descobertas milhares de cavernas na região, patrimônio até então desconhecido.

Considerações finais

Regiões cársticas são áreas com características específicas, feições geológicas formadas por processos de intemperismo químico, com fragilidades ambientais que exigem gestão do território e instrumentos que regulem o uso e ocupação do solo. Por este motivo, a classificação das regiões cársticas e províncias espeleológicas brasileiras devem ser baseadas em conceitos bem definidos que assegurem proteção destas áreas.

Assim, estabelece-se aqui definições para região cárstica, província espeleológica, distrito e núcleo cárstico/espeleológico. Visa-se, com isto, evitar dúvidas e ambiguidades na caracterização de novas áreas, seja com ocorrência de cavernas, seja em relevos cársticos. Tais redefinições de conceitos têm por objetivo tratá-los como unidades da paisagem, para a gestão do território e para a conservação do patrimônio cárstico e espeleológico brasileiro.

A ausência, baixo ou médio potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas não podem ser características limitantes para classificar uma *região cárstica*, ou até mesmo uma *província espeleológica*. Com tal objetivo, a pesquisa propõe o indicador de *potencial espeleológico estimado* (PEE), um algoritmo que pode ter aplicação em várias finalidades, como licenciamentos ambientais, gestão de áreas urbanas e rurais, avaliação do potencial turístico, identificação de áreas prioritárias para a conservação, planos de manejo, zoneamentos ecológico-econômicos, além da possibilidade de servir como base para o desenvolvimento de políticas públicas.

Análises de detalhe são necessárias em todo o território brasileiro. Com uma base conceitual clara e o uso de escalas adequadas, evitando generalizações e adotando o princípio da precaução, é possível identificar e classificar novas regiões cársticas e provínciais espeleológicas. Com estes princípios foi possível caracterizar a região cárstica dos Campos Gerais. Contudo, há registros de feições cársticas em

áreas de afloramento da Formação Furnas em outros estados do Brasil, o que indica a potencialidade de estabelecimento de novas regiões cársticas.

Há lacunas e ambiguidades na legislação que tratam, de maneira direta ou indireta, do controle do uso e proteção do patrimônio cárstico e espeleológico da região cárstica dos Campos Gerais. Os órgãos ambientais licenciadores municipais e estaduais não exigem estudos cárstico/espeleológicos de detalhe como condicionantes para a instalação de empreendimentos de alto impacto ambiental. Este conjunto de circunstâncias coloca em risco o patrimônio geológico cárstico em questão.

Para modificação deste panorama sugere-se as seguintes ações:

- definição clara dos conceitos de *região cárstica* e *província espeleológica*, destacando a existência de processos cársticos em áreas compostas por rochas não carbonáticas, bem como áreas de alto potencial espeleológico em rochas atípicas para a formação destas feições, como granitos, gnaisses, riolitos etc.;

- reconhecimento legal dos mapas de regiões cársticas e províncias espeleológicas, de potencialidade de ocorrência de cavernas e das áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico, a fim de atribuir valor jurídico para estes documentos cartográficos;

- atualização constante, no máximo a cada dois anos, dos mapas de regiões cársticas e províncias espeleológicas, potencialidade de ocorrência de cavernas e de áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico;

- modificações na legislação federal, estaduais e municipais, incluindo de modo claro e conciso a exigência de exploração e prospecção espeleológica de detalhe, conforme método proposto por Moura (2013), para o licenciamento espeleológico em toda e qualquer área com ocorrência ou potencialidade espeleológica e cárstica, independente do tipo de rocha;

- publicação de documentos de referência para elaboração de estudos cársticos/espeleológicos para o licenciamento espeleológico por órgãos ambientais estaduais e municipais, seguindo os métodos de levantamentos e orientações apresentados por ICMBIO e CECAV (2011), e capacitação dos servidores públicos para atuação em licenciamento ambiental espeleológico;

- adoção do princípio da precaução, em todos os casos em que não há registro de feições cársticas/espeleológicas, mas que a área tenha indícios ou potencial para ocorrência;

- aumento do quadro de servidores públicos para atuação em licenciamento ambiental nas diferentes esferas da Federação;

- aumento nos investimentos, por parte do Poder Público, em projetos de pesquisa e formação profissional na área de espeleologia e carstologia e;

- criação de mecanismos e ações públicas que incentivem e fortaleçam os trabalhos de grupos de espeleologia, a fim de aumentar o conhecimento sobre o patrimônio cárstico/espeleológico brasileiro.

Referências

AMBIOTECH - CONSULTORIA AMBIENTAL. 2018. **Relatório Ambiental Simplificado (RAS) Trecho de LT entre a subestação Castro Norte e o seccionamento da LT 230 KV Klacel - Ponta Grossa Norte**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/Editais_Estudo_2019/Estudos_2019/Engie_Grupo_VII.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER - CONSULTORIA AMBIENTAL. 2014. **Estudo de Impactos Ambientais PCH Fortaleza**. Disponível em: < http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2016_EIA_RIMA/EIA_PCH_FORTALEZA_2016.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2016. **Estudo de Impactos Ambientais PCH Beira Rio**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/BEIRA_RIO_PCH_EIA.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2016. **Relatório Ambiental Simplificado PCH Macacos**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/Macacos_PCH_RAS.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. 2019. Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE. Disponível em: <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>. Acesso em 19 de agosto de 2019.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E. L.; BRANDI, R.. **As grandes cavernas do Brasil**. v. 1. Belo Horizonte: Rona Editora, 2001.

AULER, A. S.. **Karst areas in Brazil and the potential for major caves-an overview**. Bol. Soc. Venezolana Espel, v. 36, p. 29-35, 2002.

AULER, A. S.. **Histórico, ocorrência e potencial de cavernas no Brasil.** In.: Rubbioli EL, Auler AS, Menin DS, Brandi R (organizadores). Cavernas. Atlas do Brasil Subterrâneo. Editora IABS, Brasilia. 2019, p. 10-47.

BIOMETRIA – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2015. **Estudo de Impactos Ambientais Parque Eólico Batavo**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_EIA_RIMA/EIA_Parque_Eolico_Batavo.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

BRASIL. 1988. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

BRASIL. 1990. **Decreto Federal Nº 99.556, de 1º de Outubro de 1990**. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99556-1-outubro-1990-339026-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

BRASIL. 2008. **Decreto n° 6.640, de 7 de novembro de 2008**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

CEMA – CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ. 2013. **Resolução CEMA nº 088, de 27 de agosto de 2013**. Disponível em: <https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=101120&indice=1&totalRegistros=9&dt=13.7.2019.16.29.54.207>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

CANIE - CADASTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES ESPELEOLÓGICAS. 2019. **Relatório Estatístico do CANIE**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/index.php?option=com_icmbio_canie&controller=relatorioestatistico&itemPesq=true>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2020.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. 2009. **Mapa das regiões cársticas do Brasil**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-atividades/regioes_carsticas/mapa_provincias_espeleo_brasil_a1_reamostrado.pdf>. Acessado em: 13 de agosto de 2019.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. 2012. **Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-

atividades/mapa_potencialidade_BR_CECAV_jun12.pdf>. Acessado em: 15 de agosto de 2019.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. 2018a. **Mapa de áreas de ocorrência de cavernas no Brasil**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>. Acessado em: 13 de agosto de 2019.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. 2018b. **Áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/areas-prioritarias-conservacao.html>. Acessado em: 18 de agosto de 2019.

CIAAMBIENTAL – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2017. **Relatório Ambiental Simplificado CGH Rio do Salto e LT**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_RAS/CGH_Rio_do_Salto_e_LT.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

GEOCONSULTORES – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. 2018. **Estudo de Impactos Ambientais Linha de Transmissão de Energia 525 kV Ponta Grossa – Bateias (C1 e C2)**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/Editais_Estudo_2019/Estudos_2019/VOLI_EIA_LT525_PONTAGROSSA_BATEIAS.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

GEOPLANEJAMENTO – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2016. **Estudo de Impactos Ambientais Lavra e beneficiamento de Areia Quartzosa**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/eia_jundu_texto.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE; CECAV – CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS. 2011. **Apostila do III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília/DF. 197p.

IGPLAN - CONSULTORIA AMBIENTAL. 2010. **Estudo Prévio de Impacto Ambiental PCH Castro**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1463.html>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

IG TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO. 2015. **Relatório Ambiental Simplificado Linha de Transmissão LT 23KV Figueira/Ponta Grossa**. Disponível em:

<http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_RAS/RAS_FRA_Klacel_Final.pdf>. Acesso em 17 de agosto de 2019.

JANSEN, D. C.; CAVALCANTI, L. F.; LAMBLÉM, H. S.. **Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na Escala 1:2.500.000**. Revista Brasileira de Espeleologia, Brasília: CECAV, v. 2, n. 1, p. 42-57, 2012. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/revistaeletronica/index.php/RBEsp/article/view/255/pdf_255>. Acessado em: 16/07/2018.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E.. **Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil**. Espeleotema, Monte Sião, v. 13, p. 105-167, 1979.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E.. **Speleological provinces in Brazil. International Congress of Speleology**. Anais... Barcelona: UIS. 1986.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. 2014. **Estudo de Impactos Ambientais Complexo Eólico-Elétrico Campos Gerais**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1474.html>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

MAACK, R.. **Fenômenos carstiformes de natureza climática e estrutural de arenitos do Estado do Paraná**. Arquivos de Biologia e Tecnologia 11: 151–162. 1956.

MARTINS, S. B. M. P. **Levantamento dos recursos naturais do distrito espeleológico de Altinópolis-SP**. Relatório FAPESP, proc. 83/2552-3, Rio Claro-SP. 1985.

MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F.. **Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 32, p. 2149- 2164. 2007.

MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; CHINELATTO, A. L.; GIANNINI, P. C. F.; PONTES, H. S.; CHINELATTO, A. S. A.; ATENCIO, D.. **Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil.** Journal of South American Earth Sciences 63 (2015) 20-35. 2015.

MMA - MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. 2017. **Instrução Normativa MMA Nº 2, de 31 de agosto de 2017**. Disponível em:

<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=01/09/2017&jornal=1&pagina=161&totalArquivos=208>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

MOCHIUTTI, N. F. B.; TOMAZZOLI, E. R.. **Espeleotemas de uma caverna granítica na Ilha de Santa Catarina: uma análise preliminar**. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017. Ouro Preto. Anais... Campinas: SBE, 2017. p. 327-333. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_327-333.pdf>. Acesso em: 14 de agosto de 2019.

MOURA, V. **Prospecção espeleológica, topografia e espeleometria de cavernas**. In.: III Curso de Espeleologia e licenciamento Ambiental. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio); Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). 2011. p. 45-71. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

PARELLADA, Cláudia Inês. Províncias Espeleológicas Paranaenses: uma revisão. In: RASTEIRO, M.A.; SANTOS-NETO, C.J.. (orgs.) CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 20, 1989. Brasília. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p.9-16. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais20cbe/20cbe_009-016.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. **Introdução à Espeleologia.** In.: III Curso de Espeleologia e licenciamento Ambiental. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio); Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). 2011. p. 7-23. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2004. **Lei nº 7.636, de quatro de junho de 2004**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=7.636>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2005. **Decreto nº 568, de dezessete de novembro de 2005**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=568%2F2005>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2006. **Lei nº 8.473, de dois de março de 2006**. Disponível em:

<https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=8.473>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2010. **Lei nº 10.417, de 17 de novembro de 2010**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=10.417>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2012. **Lei nº 11.233, de 27 de dezembro de 2012**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=11.233%2F2012>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2013. **Decreto nº 8.060, de 03 de dezembro de 2013**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=8060%2F2013>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2015a. **Lei nº 12.128, de 27 de dezembro de 2015**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=+12.128>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2015b. **Lei nº 12.192, de 25 de junho de 2015**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12.192>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2015c. **Lei nº 12.342, de 15 de dezembro de 2015**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12.342>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2015d. **Lei nº 12.345, de 20 de novembro de 2015**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12345%2F2015>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2016. **Decreto nº 10.996, de 01 de fevereiro de 2016**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=10.996>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2018a. **Decreto nº 13.957, de 17 de janeiro de 2018**. Disponível em: < https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=13.957>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG – PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. 2018b. **Decreto nº 14.085, de 20 de fevereiro de 2018**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=14.085 >. Acesso em 18 de agosto de 2019.

PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L.. 2016. **Riscos eminentes ao patrimônio cárstico não carbonático dos Campos Gerais do Paraná: conflitos na conceituação, lacunas na legislação ou negligência?**. In: Anais do XI SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia - UGB - União da Geomorfologia Brasileira, Maringá (PR). Disponível em: <http://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/9/9-499-133.html>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L.; FOLTRAN, A. C.; PONTES, F. S.; GUIMARÃES, G. B.; MOCHIUTTI, N. F. B.; GUIMARÃES, S. K.; BURGARDT, S.; DO VALE, T. F.; FEITOSA, N. M. das N.. **Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais: Ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação**. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas - GUPE - Ponta Grossa. 2018a. Disponível em: < https://issuu.com/gupe.espeleo/docs/patrim_nio_espeleol_gico_do_parque_>. Acesso em 15 de agosto de 2019.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., FERNANDES L.A., FOLTRAN A.C., MELO M.S., MOREIRA J.C., 2018b. **Caves geodiversity evaluation as an instrument to the management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil**. Geoheritage, 10(1):1-11. https://doi.org/10.1007/s12371-018-0317-9

RECITECH – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2016. **Relatório Ambiental Simplificado CGH São João**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_RAS/CGH_Sao_Joao_CGH_PCA.pdf>. Acesso em 18 de agosto de 2019.

RESITEC - CONSULTORIA AMBIENTAL. 2007. **Estudo de Impactos Ambientais Central de Tratamento de Resíduos Furnas (CTR/Furnas)**.

SILVA, M. D.. **Gênese e evolução das cavernas marinhas do maciço costeiro do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC)**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. 2018. 238p.

SMMA – SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE. 2017a. **Instrução Normativa SMMA n° 1-001/2017**. Disponível em: <https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/1-extracao-mineral/1.1-cascalheira/1.001-geral/IN_LA_1-001_2017-SMMA.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA – SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE. 2017b. **Instrução Normativa SMMA n° 1-002/2017**. Disponível em: <https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/1-extracao-mineral/1.2-extracao-de-pedras-irregulares-de-modo-artesanal/1.002-geral/IN_LA_1-002_2017-SMMA.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA – SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE. 2017c. **Instrução Normativa SMMA n° 2-001/2017**. Disponível em: <https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/2-atividades-agropecuarias-e-silviculturais/2.1-suinocultura/IN_LA_2-001_2017-SMMA.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA – SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE. 2017d. **Instrução Normativa SMMA n° 10-001/2017**. Disponível em: <https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/10-empreendimentos-imobiliarios/10.1-loteamentos/IN_LA_10-001_2017-SMMA.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA – SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE. 2017e. **Instrução Normativa SMMA n° 10-002A/2017**. Disponível em: <https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/10-empreendimentos-imobiliarios/10.2-implantacao-de-conjuntos-habitacionais/10.2A-conjunto-habitacional-geral/IN_LA_10-002A_2018-SMMA.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SOMA – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2011. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Telêmaco Borba**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1463.html>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SOMA – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2013. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Tibagi Montante**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1461.html>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SPOLADORE, A.. 2005. **Novas cavernas em arenito no Estado do Paraná**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Espeleologia. Vol. 28. p. 125-135.

TITANIUM – CONSULTORIA AMBIENTAL. 2015. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Santa Branca**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1497.html>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa apresentou um estudo de caso no município de Ponta Grossa, envolvendo definição e caracterização do carste das rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha. Este estudo local de detalhe serviu de suporte para a identificação de uma região cárstica, que engloba vários municípios de dois Estados brasileiros. Esta estrutura de análise permitiu a avaliação da legislação vigente e do atual gerenciamento do uso do solo nesta área, revisão e redefinição de conceitos e proposição de novos índices de caraterização e quantificação da geodiversidade em cavernas. Por fim, sugestões de revisão de protocolos e gestão de áreas cársticas em relevos não carbonáticos puderam ser apresentadas.

Os processos de carstificação em rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha foram confirmados. Estas rochas, sobretudo quartzoarenitos de cimento não carbonático, foram submetidas ao intemperismo químico, envolvendo a dissolução de seus componentes, cimento e o arcabouço quartzoso. Assim, foram classificados como relevos cársticos não carbonáticos.

Neste tipo de relevo os processos do intemperismo químico são determinantes para o desenvolvimento das feições e formas distintas. Mediante processos químicos - por exemplo, hidratação, dissolução, hidrólise e oxidação -, íons e moléculas são removidos da superfície dos minerais que compõem a rocha, formando porosidade secundária por carstificação, com remoção parcial ou total do material. Em ambos os casos, com a lixiviação de íons e moléculas, há criação de vazios (cavidades subterrâneas, núcleos e dutos de dissolução). A lixiviação também contribui para a formação de espeleotemas, pois esta remoção de parte dos constituintes da rocha disponibiliza matéria prima para a ocorrência de precipitações minerais.

As feições geológicas de origem cárstica foram identificadas mediante inventário da geodiversidade de cavidades subterrâneas. Este levantamento foi realizado no Parque Nacional dos Campos Gerais, território que compreende parte da área de estudo. Dentre as 33 cavernas inventariadas e quantificadas, o Sumidouro do Rio Quebra-Perna e a Caverna das Andorinhas obtiveram a melhor classificação na valoração/quantificação da geodiversidade.

A avaliação mediante inventário e quantificação da geodiversidade subterrânea permitiu atribuir um índice numérico como resultado que,

consequentemente, permitiu classificar objetivamente as cavernas quanto à sua geodiversidade. Trata-se, portanto, de um instrumento de gestão que possibilita a identificação e hierarquização dos ambientes mais expressivos cientificamente, assim como os mais ameaçados, que exigem ações urgentes de gestão e manejo. O método pode subsidiar propostas de expansão ou criação de novas áreas de proteção da natureza e auxiliar o processo de classificação da relevância espeleológica para fins de licenciamento ambiental, de acordo com a legislação vigente no Brasil.

O inventário da geodiversidade das cavernas possibilitou a identificação das feições geológicas de origem cárstica. Incluem-se nesta categoria formas oriundas de processos de precipitação, intemperismo e erosão, como: cavernas, depressões no terreno, canais de parede e teto, dutos de dissolução, cúpulas, alvéolos (*tafoni*), rochas arenizadas e/ou fantomizadas e espeleotemas.

Estas feições se associam principalmente a arenitos com granulação média. Descontinuidades relacionadas a estruturas sedimentares e tectônicas têm controle primordial no seu desenvolvimento, pois podem facilitar ou dificultar a circulação de fluidos em zonas profundas, possibilitando ou inibindo a ação do intemperismo químico e a abertura de vazios, dutos, galerias e cavernas. As características litofaciológicas contribuem para ocorrência, mas não são determinantes.

A criação de dutos e núcleos de dissolução em contexto freático e evolução destes na zona aerada teve como consequência a formação de depressões no terreno (dolinas) e cavernas. Os relevos ruiniformes desenvolvidos na área estudada são produtos desta carstificação subterrânea, que evoluíram e foram esculpidos posteriormente por processos de intemperismo químico e físico em superfície.

Considera-se, com base na pesquisa, que a formação e evolução das formas atuais de relevo, subterrâneas e superficiais, explica-se com o modelo genético de primocarste. Processos de arenização e fantomização atuaram nestes arenitos, uma vez que há registros de dissolução de diferentes tipos de cimento (caulinítico/óxidos de ferro/sobrecrescimento sintaxial de quartzo) e do arcabouço quartzoso. Verificou-se que a fantomização foi mais atuante, pois a dissolução dos cimentos caulinítico (para a Formação Furnas) e de óxidos de ferro/caulinítico (para o Arenito Vila Velha) prevaleceu em relação à alteração química verificada nos grãos e no sobrecrescimento de quartzo.

Os espeleotemas, resultados da dissolução dos grãos de quartzo e dos cimentos cauliníticos e óxidos ferrosos, são uma feição característica de processo cárstico nos quartzoarenitos da Formação Furnas e na subunidade Vila Velha. Estas feições são compostas principalmente por sílica (opala-A e sílica criptocristalina) e caulinita, com menor ocorrência de gipsita e óxido de ferro amorfo associado à goethita e hematita.

Nas unidades litológicas estudadas foram identificadas seis formas de espeleotemas: 1) arborescentes ou corais, 2) cogumelos, 3) estalactíticos, 4) estalagmíticos, 5) colunares com crescimento horizontal/ascendente e 6) fibrosos. Os espeleotemas se desenvolvem em todas as fácies areníticas em decorrência da boa permoporosidade do material, principalmente em locais com anisotropias como planos de acamamento, estratificações e fraturas, que controlam o fluxo de fluidos e a precipitação química. Com menor frequência, os espeleotemas ocorrem em camadas conglomeráticas e síltico-argilosas (na Formação Furnas).

Em vários espeleotemas foram identificadas bioassinaturas, cianobactérias, bactéria *Gallionella ferruginea*, diatomáceas e outros micro-organismos capazes de precipitar minerais, como sílica, caulinita e óxidos de ferro. Estes registros sugerem influência biológica na gênese dos espeleotemas, podendo ser classificados como microbialitos, produtos resultantes de organomineralização ou mineralização biologicamente induzida.

Os espeleotemas arborescentes ou corais, estalactíticos, estalagmíticos e colunares com crescimento horizontal/ascendente apresentam, em suas fases genéticas, tanto ação microbiológica, como processos químicos inorgânicos. Os espeleotemas do tipo cogumelos são os que podem ser classificados como microbialitos com mais razão, pois a ação microbial prevaleceu em sua gênese. Os depósitos do tipo fibrosos também apresentam possibilidade de serem minerais resultados de processos metabólicos de micro-organismos. Contudo, a raridade de ocorrência e baixa quantidade disponível destes exemplares impossibilitou a coleta para análises mais específicas.

Esses depósitos minerais podem registrar informações valiosas sobre a história evolutiva do ambiente subterrâneo e da paisagem superficial, principalmente as oscilações climáticas quaternárias. Recentes descobertas em pequenas cavidades subterrâneas na área do presente estudo, denominadas de abrigos, revelaram espeleotemas de composição mineral distinta dos tipos comuns

conhecidos, e inédita para cavidades em rochas da Formação Furnas. Atualmente em fase de investigação, estas informações reafirmam a riqueza, potencial para novas descobertas e importância da geodiversidade das cavernas em quartzoarenitos dos Campos Gerais do Paraná.

A caracterização detalhada das feições geológicas cársticas nas rochas da Formação Furnas e da subunidade Vila Velha no município de Ponta Grossa permite classificar como carste toda a área de exposição destas unidades litoestratigráficas, nos Campos Gerais do Paraná e em uma pequena porção do estado de São Paulo. Assim, uma nova região cárstica brasileira é proposta, denominada de região cárstica dos Campos Gerais (RCCG).

Os conceitos de região cárstica, província espeleológica, distrito e núcleo cárstico/espeleológico foram revisados, a fim de evitar dúvidas na classificação de novas áreas cársticas, sejam aquelas com ocorrência de cavernas, seja em relevos cársticos. Os conceitos em questão foram redefinidos de forma a serem considerados como unidades da paisagem para a gestão do território e conservação do patrimônio cárstico e espeleológico brasileiro.

Região cárstica é compreendida como uma área contígua, de grande extensão territorial, geograficamente delimitada a partir de características litoestratigráficas, composta por uma ou várias unidades geológicas carbonáticas ou não, constituídas por relevos cársticos. Áreas com alto potencial espeleológico, mas que não são classificadas como relevos cársticos, são províncias espeleológicas. Distritos e núcleos cárstico/espeleológico são subdivisões de região cárstica e província espeleológica, desenvolvidos em apenas uma unidade geológica, carbonática ou não.

A ausência, baixo ou médio potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas e a presença de rochas carbonáticas não devem ser fatores determinantes para a classificação de uma região cárstica ou província espeleológica, bem como para a determinação do seu potencial espeleológico. Neste sentido, a pesquisa permitiu propor um índice de potencial espeleológico estimado (PEE), um algoritmo que pode ser utilizado para várias finalidades, como licenciamentos ambientais, gestão de áreas urbanas e rurais, avaliação do potencial turístico, identificação de áreas prioritárias para a conservação, além da possibilidade de servir como base para o desenvolvimento de políticas públicas.

O distrito cárstico de Ponta Grossa (DCPG), integrante da RCCG, possui 107 cavidades naturais subterrâneas, porém apenas 16,2% do total da área com potencialidade elevada foi explorada, apontando potencial para existência de mais de 700 cavernas. Ao estender os cálculos do PEE para toda a RCCG o resultado mostra um potencial para a existência de mais de 7,7 mil cavidades.

Há lacunas e subjetividades na legislação que trata (de maneira direta ou indireta) do controle do uso e proteção do patrimônio cárstico e espeleológico da região cárstica dos Campos Gerais. Somam-se a este problema, a não exigência de estudos de detalhe pelos órgãos ambientais licenciadores (municipal e estadual), como condicionantes para a instalação de empreendimentos de alto impacto ambiental. Estas duas situações colocam em risco o patrimônio geológico cárstico em questão, uma vez que grandes empreendimentos e atividades geradoras de impactos diretos à RCCG não apresentaram estudos cársticos/espeleológicos suficientes, com várias situações de total exclusão do tema em questão.

Uma região cárstica apresenta fragilidades ambientais que exigem gestão do território diferenciada, a fim de evitar acidentes geoambientais, proteger o patrimônio geológico e as águas subterrâneas. Nestas condições, as feições de origem cárstica desenvolvidas nas rochas da Formação Furnas e subunidade Vila Velha devem ser consideradas nas políticas públicas e nos procedimentos administrativos de gestão ambiental, buscando garantir a geoconservação. Processos de licenciamento ambiental de atividades e empreendimentos diversos, principalmente aqueles com potencial lesividade ao patrimônio geológico cárstico, devem se nortear pelo princípio da precaução. Além disso, estudos de prospecção e levantamentos espeleológicos de detalhe devem ser exigências obrigatórias e indispensáveis nestes casos.

O uso e ocupação do solo na RCCG devem ser orientados em instrumentos de gestão específicos, como zoneamentos ambientais cársticos e zoneamentos espeleológicos. Instrumentos de gestão consolidados também devem incluir as características desta área, como planos diretores municipais, planos de gestão de bacias hidrográficas, zoneamento econômico-ecológico, lei de zoneamento urbano e de uso e ocupação das áreas rurais, planos de manejo de unidades de conservação, entre outros.

Paralelamente a gestão do território, é importante o aumento de investimentos públicos direcionados à manutenção de unidades de conservação e

criação de novas áreas protegidas. O Poder Público também precisa criar mecanismos que incentive e fortaleça os trabalhos de pesquisadores e grupos de espeleologia. Visa-se com isso o aumento do conhecimento sobre as cavernas e o relevo cárstico a nível local, regional e nacional.

Além disso, é primordial a execução constante de trabalhos de educação ambiental e patrimonial, utilizando abordagem crítica, com a comunidade externa às instituições de ensino superior e pesquisa. Responsabilidade esta da comunidade acadêmica. Esta é a única maneira de fazer chegar à sociedade o conhecimento científico. Se a informação e o conhecimento tornar-se acessíveis, as pessoas terão a possibilidade de aprender e compreender a importância de proteger o patrimônio cárstico e espeleológico, despertando ao mesmo tempo, o sentimento de identidade e pertencimento. Quanto mais pessoas se importarem com este patrimônio geológico, mais ações serão exigidas em prol da geoconservação.

REFERÊNCIAS

AMBIOTECH. Consultoria Ambiental. 2018. **Relatório Ambiental Simplificado (RAS) Trecho de LT entre a subestação Castro Norte e o seccionamento da LT 230 KV Klacel - Ponta Grossa Norte**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/Editais_Estudo_2019/Estudos_2019/Engie_Grupo_VII.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER. Consultoria Ambiental. 2014. **Estudo de Impactos Ambientais PCH Fortaleza**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2016_EIA_RIMA/EIA_PCH_FORTALEZA_2016.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER. Consultoria Ambiental. 2016. **Estudo de Impactos Ambientais PCH Beira Rio**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/BEIRA_RIO_PCH_EIA.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

AMÜLLER. Consultoria Ambiental. 2016. **Relatório Ambiental Simplificado PCH Macacos**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/Macacos_PCH_RAS.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

ANM. Agência Nacional de Mineração. 2019. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE**. Disponível em: http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/. Acesso em 19 de agosto de 2019.

AHMADI, A.; MOGHIMI, E; ZAMANZADEH, S.M.; MOTAMED, R, 2015. **The Effect of Sandstone Composition on Distribution of Tafoni Landforms in the Aghajari Sandstone, Northwest of Masjed Soleyman, Iran**. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Geology. Volume 2015, p. 1-10.

AUBRECHT R., BARRIO-AMORÓS C.L., BREURE A.S.H., BREWER-CARÍAS C., DERKA T., FUENTES-RAMOS O.A., GREGOR M., KODADA J., KOVÁČIK Ľ., LÁNCZOS T., LEE N.M., LIŠČÁK P., SCHLÖGL J., ŠMÍDA B. & VLČEK L. 2012 - **Venezuelan tepuis: their caves and biota**. Acta Geologica Slovaca – Monograph, Comenius University, Bratislava, 168 p.

AUBRECHT, R.; BREWER-CARÍAS, CH.; ŠMÍDA, B.; AUDY, M.; KOVÁČIK, L'. 2008. **Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela**. Sedimentary Geology 203. 181–195. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.10.005

ARAÚJO, T. P. **Sistema fluvial ou dominado por maré?: estudos de processo de sedimentação e arquitetura deposicional no Canyon do Guartelá, Formação Furnas, Devoniano Inferior, Bacia do Paraná, Brasil**. aDissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 2016.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E. L. & BRANDI, R.. **As grandes cavernas do Brasil**. v. 1. Belo Horizonte: Rona Editora, 2001.

AULER, A. S.. **Karst areas in Brazil and the potential for major caves-an overview**. Bol. Soc. Venezolana Espel, v. 36, p. 29-35, 2002.

AULER, A. S.. **Histórico, ocorrência e potencial de cavernas no Brasil**. In.: Rubbioli EL, Auler AS, Menin DS, Brandi R (organizadores). Cavernas. Atlas do Brasil Subterrâneo. Editora IABS, Brasilia. 2019, p. 10-47.

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. J. 1994. **Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 24 (2): 77-89.

ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, São Paulo. 1996.

ASSINE, M.L. 1999. **Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas, no flanco sudeste da bacia do Paraná**. Rev. Bras. Geociências, São Paulo. 29: 357-370.

AZEVEDO, U. R. **Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero,Minas Gerais: potencial para a criação de um Geoparque da UNESCO**. 203 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BARRETO, K. T. **Dinâmica pedogeomorfológica na Formação Furnas - bacia do rio Verde/ Ponta Grossa - PR**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território : Sociedade e Natureza) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, 2016.

BASKAR, S., BASKAR, R., KAUSHIK, A., 2007 - **Evidences for microbial involvement in the genesis of speleothem carbonates, Borra Caves, Visakhapatnam, India**. Current Science, 92(3): 350-355.

BENNETT, P. C. 1991. **Quartz disolution in an organic-rich aqueous system**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 1781-1797

BENITE, A. M. C.; MACHADO, S. P.; MACHADO, B. C. **Sideroforos: "uma Resposta dos Microorganismos"**. Química nova, v. 25, n. 6/B, p. 1155-1164, 2002.

BERBERT-BORN, M. 2010. **Instrução Normativa MMA 2/09 - método de classificação do grau relevância de cavernas aplicado ao licenciamento ambiental: uma prática possível?** SBE – Campinas, SP. Espeleo-Tema. 21 (1): 67-103.

BERGAMASCHI, S. 1992. **Análise Sedimentológica da Formação Furnas na Faixa de Afloramentos do Flanco Norte do Arco Estrutural de Ponta Grossa, Bacia do Paraná**. 172p. (Dissertação de Mestrado. IG-UFRJ, Rio de Janeiro).

BERNER, R. A. (1978). **Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions**. American Journal of Science, 278(9), 1235-1252.

BIGARELLA,J. J.; SALAMUNI, R.; MARQUES FILHO, P. L. 1966. **Estruturas e texturas da Formação Furnas e sua significação paleogeográfica**. Boletim da Universidade Federal Paraná. Geologia, 18, 114p.

BIGARELLA, J. J; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das Paisagens tropicais e subtropicais.** Volume 01. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Ação do intemperismo químico sobre as rochas.** In. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 2° ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. Cap. 3, p. 110 -190.

BIOMETRIA. Consultoria Ambiental. 2015. **Estudo de Impactos Ambientais Parque Eólico Batavo**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_EIA_RIMA/EIA_Parque_Eolico_Batavo.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

BITTENCOURT, L. A. F.; DE PAULA, A. **Análise cienciométrica de produção científica em unidades de conservação federais do Brasil**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, n.14; p. 2044-2054. 2012.

BLOOM, A.L. **Intemperismo das rochas**. In. Superfície da Terra. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo – 1970. Cap. 2. p 30-55.

BOCARDI, L.B., 2005. **Petrologia e aspectos diagenéticos de arenitos reservatórios do Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano), Bacia do Paraná**. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 103p.

BORBA, A. W. **Geodiversidade e geopatrimônio como bases para estratégias de geoconservação: conceitos, abordagens, métodos de avaliação e aplicabilidade no contexto do Estado do Rio Grande do Sul**. Pesquisas em Geociências, Porto Alegre, v.38, n.1, p. 3-13, 2011.

BORGHI, L. **Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas (Prídoli Devoniano inferior) em afloramentos do bordo leste da bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1993.

BRASIL. 2000. **Lei 9.985, DE 18 DE JULHO DE 2000. n° 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm. Accessado em 17 de Abril de 2017.

BRASIL. 1988. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em 13 de agosto de 2019.

BRASIL. 1990. **Decreto Federal Nº 99.556, de 1º de Outubro de 1990**. Disponível em: http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99556-1-outubro-1990-339026-publicacaooriginal-1-pe.html. Acesso em 13 de agosto de 2019.

BRASIL. 2008. **Decreto n° 6640 de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5o e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional**. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm. Acessado em: 16 de setembro de 2017

BREHM, U.; GORBUSHINA, A. A.; MOTTERSHEAD, D. 2005. **The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass**. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 219 (2005) 117–129. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.10.017.

BRILHA, J. 2005. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica**. Lisboa: Palimage. 183p.

BRILHA J. 2016. **Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review**. The European Association for Conservation of the Geological Heritage. Geoheritage 8:119–134. https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3

BRUSCHI, V. M. 2007. **Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad**. Tesis Doctoral-Universidad de Cantabria. Santander-España. 263 p.

BRUXELLES, L.; QUINIF, Y.; WIÉNIN, M. 2009. **How can ghost rocks help in karst development?** 15th International Congress of Speleology. 2009 ICS Proceedings, p. 814-819.

BÜDEL, B.; WEBER, B.; KÜHL, M.; PFANZ, H.; SÜLTEMEYER, D.; WESSELS, D. (2004). **Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes**. Geobiology, 2(4), 261-268.

BUDNY, J. M. **Imágenes de una cueva en arenisca, Paraná, Brasil: la Cueva Lindolfo**. Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean. 2002. p 1-2. Disponível em: www.fealc.org/boletines/BOL25_febrero2002.doc. Acessado em 12/02/2018.

BUDNY, J. M. **Algunas cuevas en areniscas en Parana, Brasil**. Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean. 2004. p 2-7. Disponível em: http://www.fealc.org/boletines/boletin45.htm. Acessado em 12/02/2018.

BUREK C.; POTTER J. 2002. **Local geodiversity action plans. Setting the context for geological conservation**. Unpublished report for English Nature, Peterborough, UK, 64 p.

CAMA, J.; METZ, V.; GANOR, J. 2002. **The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions.** Geochimica and Cosmochimica Acta 66(22): 3913–3926.

CAMA, J.; GANOR, J. 2006. **The effects of organic acids on the dissolution of silicate minerals: a case study of oxalate catalysis of kaolinite dissolution**. Geochim. Cosmochim. Acta 70, 2191e2209.

CAÑAVERAS, J.C., SÁNCHEZ-MORAL, S., SOLER, V., SAIZ-JIMÉNEZ, C., 2001 - **Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls**. Geomicrobiology Journal, 18: 223-240. http://dx.doi.org/10.1080/01490450152467769

CANIE. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. 2020. **Relatório Estatístico do CANIE**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/index.php?option=com_icmbio_canie&controller=relatorioestatistico&itemPesq=true. Acesso em: 06 de fevereiro de 2020.

CANUTO, J. R.; ROCHA-CAMPOS, A. C.; SATO, P. E. S. 1997. **The Late Paleozoic Lapa Sandstone (Itarare Subgroup): a possible tunnel-valley fill?**. Anais da Academia Brasileira de Ciências,69(2):275-276.

CARCAVILLA URQUI, L.; LÓPEZ-MARTINEZ, J.; DURÁN VALSERO, J.J. 2007. **Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación com los espacios naturales protegidos**. Instituto Geológico e Minero de España, Madri, 360 p.

CECAV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2009. **Mapa das regiões cársticas do Brasil**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-atividades/regioes_carsticas/mapa_provincias_espeleo_brasil_a1_reamostrado.pdf. Acessado em: 13 de agosto de 2019.

CECAV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2012. **Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-atividades/mapa_potencialidade_BR_CECAV_jun12.pdf. Acessado em: 15 de agosto de 2019.

CECAV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2018a. **Mapa de áreas de ocorrência de cavernas no Brasil**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html. Acessado em: 13 de agosto de 2019.

CECAV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2018b. **Áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/areas-prioritarias-conservacao.html. Acessado em: 18 de agosto de 2019.

CEMA. Conselho Estadual do Meio Ambiente do Paraná. 2013. **Resolução CEMA nº 088, de 27 de agosto de 2013**. Disponível em: https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=101120&indice=1&totalRegistros=9&dt=13.7.2019.16.29.54.207. Acesso em 13 de agosto de 2019.

CENDRERO, A. 1996. **Propuesta sobre criterios para la clasificación y catalogación del patrimônio geológico**. In El patrimonio geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización, Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 29-38.

CENDRERO, A. 2000. **Patrimonio Geológico; diagnóstico, clasificación y valoración**. In Jornadas sobre Patrimonio Geológico y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Medio Ambiente, Serie Monografías, 23-37.

CHAN C.S., FAKRA S.C., EMERSON D., FLEMING E.J., EDWARDS K.J., 2011 - **Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: implications for biosignature formation**. The ISME Journal, 5: 717–727. https://dx.doi.org/10.1038%2Fismej.2010.173.

CHRISTOFOLETTI, A. **A morfologia cárstica**. In. Geomorfologia. São Paulo, Edgard Blücher, 1º ed, 1974. Cap. 6. p. 120-124.

CIAAMBIENTAL. Consultoria Ambiental. 2017. **Relatório Ambiental Simplificado CGH Rio do Salto e LT**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_RAS/CGH_Rio_do_Salto_e_LT.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

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

COURREGES-BLANC, M.; MAIRE, R. **Altération de type fantôme de roche dans les calcaires oligocènes du Médoc (France): étude pétrographique et micromorphologique**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 9–16.

CRUZ, G. C. F. da., 2007 - **Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais**. In.: Melo M. S. de, Moro R. S., Guimarães G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. Editora UEPG, 230 p.

CULVER, D. C.; SKET, B. 2000. **Hotspots of Subterranean Biodiversity in Caves and Wells**. Journal of Cave and Karst Studies 62(1): 11-17

DANDURAND, G.; MAIRE, R.; DUBOIS, C.; QUINIF, Y.. **The Charente karst basin of the Touvre: alteration of the Jurassic series and speleogenesis by ghost-rock process**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 27–32.

DECHO, A. 2000. **Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms.** In: Riding, R., Awramik, S.M. (Eds.), Microbial Sediments. Springer, Berlin, pp. 9– 15.

DE ROS, L. F., 1998. **Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the Silurian-Devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, southern Brazil**. Sedimentary Geology, 116(1-2), 99-128.

DERRUAU, M.. **Morfologia de las calizas**. In. Geomorfología. Ediciones Ariel – Espana. 1966. Cap. 4 – IV. p. 259-275.

DEWAIDE, L.; BAELE, J-M.; COLLON-DROUAILLET, P.; QUINIF, Y.; ROCHEZ, G.; VAN DYCKE, S.; HALLET, V.. **Karstification in dolomitized Waulsortian mudmounds (Belgium)**. Geologica Belgica (17/1). 2014. p. 43-51.

DIAS, M. S. 2003. **Ficha de caracterização de cavidades**. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia, Januária MG. 151-160

DIXON, G.; SHARPLES, C.; HOUSHOLD, I.; PEMBERTON, M.; EBERHARD, R. 1997. **Conservation Management Guidelines for Geodiversity**. Unpublished

Report to the Tasmanian Regional Forest Agreement Environment and Heritage Technical Committee, April 1997, 70 p.

DOVE, P. M.; RIMSTIDT, J. D. 1994. **Silica-water interaction**. Rev. Miner. 29, 259–308.

DREDGE J., FAIRCHILD I. J., HARRISON R. M., FERNANDEZ-CORTES A., SANCHEZ-MORAL S., JURADO V., GUNN J., SMITH A., SPÖTL C., MATTEY M., WYNN P.M., GRASSINEAU N. & WYNN P. M., 2013. **Cave aerosols: distribution and contribution to speleothem geochemistry.** Quaternary Science Reviews, 63, 23-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.016.

DUBOIS, C.; LANS, B.; KAUFMANN, O.; MAIRE, R.; QUINIF, Y.. **Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France)**. Karstologia 57. 2011. p. 19–27.

DUBOIS, C.; QUINIF, Y.; BAELE, J,-M.; BARRIQUAND, L.; BINI, A.; BRUXELLES, L.; DANDURAND, G.; HAVRONI, C.; KAUFMANN, O.; LANS, B.; MAIRE, R.; MARTIN, J.; RODET, J.; ROWBERRY, M.D.; TOGNINI, P.; VERGARI, A.. **The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems.** Earth-Science Reviews 131. 2014, p. 116–148.

EBERHARD, R. 1997. **Pattern and Process: Towards a Regional Aprproach to National Estate Assessment of Geodiversity**. Technical Series nº 2, Australian Heritage commission & Environment Forest Taskforce, Environment Australia-Canberra.

EHRLICH, H. L. 1996. **Geomicrobiology**. 3rd edition. Marcel Dekker, Inc., New York, 719 pp.

FERNÁNDEZ VERDÍA, M.Á., SANJURJO SÁNCHEZ, J., VIDAL ROMANÍ, J.R., 2000 - **Génesis de espeleotemas de ópalo-a en sistemas cársticos desarrollados en rocas ácidas**. Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, 25: 353-356.

FIGUEIREDO L. A. V.; RASTEIRO, M. A.; RODRIGUES, P. C. 2010. **Legislação para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro: mudanças, conflitos e o papel da sociedade civi**l. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 21(1): 49-65.

FINLAYSON, B.L., WEBB, J.A., 1985 - **Amorphous speleothems**. Cave Science, 12(12): 3-8.

FORD, D. C. 2006. **Karst geomorphology, caves and cave deposits: a review of North American contributions during the past half century**. In: Harmon, RS and Wicks CW (Eds.) – Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry. Boulder, Geological Society of America. pp 1-14.

FLÜGEL FILHO, J. C.; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S. 2011. **Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa – Paraná.** Anais do 31° Congresso Brasileiro de Espeleologia, Ponta Grossa – PR, 19 a 26 de Julho de 2011. Sociedade Brasileira de Espeleologia. 81-85.

FLÜGEL FILHO, J.C. 2012. **Geossítio Sumidouro Córrego das Fendas, Ponta Grossa (PR): geodiversidade cárstica de um sistema subterrâneo e seus valores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

FLÜGEL FILHO, J.C., GUIMARÃES, G.B., PONTES, H.S., MASSUQUETO, L.L., MELO, M.S., 2012 - **Geodiversidade dos Campos Gerais do Paraná: morfologia de espeleotemas de cavidades em arenitos da Formação Furnas**. In: anais do 46º Congresso Brasileiro de Geologia. Santos-SP. Sociedade Brasileira de Geologia.

FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E., 1988. **Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), bacia do Paraná (Parte I)**. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, 2: 147-191.

FRANÇA, A.B.; WINTER, W.R.; ASSINE, M.L. 1996. **Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canallobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências,26(1):43-56.

GALÃO, J. E.; BICHUETTE, M.E., 2015. **Taxonomic distinctness and conservation of a new high biodiversity subterranean area in Brazil**. Anais da Academia Brasileira de Ciências 87(1): 209-217. http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201520140312

GALAN, C; LAGARDE, J. **Morphologie et evolution des caverns et forms superficielles dans les quartzites du Roraima (Venezuela).** Karstologia, n. 11-12, 1988. p. 49 – 60.

GALÁN, C.; HERRERA, F.; CARREÑO, R.; PÉREZ, M.A., 2004. **Roraima sur system, Venezuela: 10.8 km, world's longest Quartzite Cave**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 38: 53-60.

GANEM, R. S., 2009. **As cavidades naturais subterrâneas e o decreto nº 6.640/2008**. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados. Brasília/DF.

GANOR, J.; LASAGA, A. C. 2005. **The effects of oxalic acid on kaolinite dissolution rate**. Disponível em: http://www.bgu.ac.il/geol/ganor/papers/G_L_94/G&L94.html. Acessado em: 27/01/2018.

GEOCONSULTORES. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. 2018. **Estudo de Impactos Ambientais Linha de Transmissão de Energia 525 kV Ponta Grossa – Bateias (C1 e C2).** Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/Editais_Estudo_2019/Estudos_2019/VOLI_EIA_LT525_PONTAGROSSA_BATEIAS.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

GEOPLANEJAMENTO. Consultoria Ambiental. 2016. **Estudo de Impactos Ambientais Lavra e beneficiamento de Areia Quartzosa**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/eia_jundu_texto.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

GOLDICH, S. S. 1938. **A study in rock-weathering**. The Journal of Geology 46, 17–58.

GRAY, M. 2004. **Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature**. John Wiley and Sons, Chichester – England.

GRAY, M. 2008. **Geodiversity: the origin and evolution of a paradigm**. In: Burek, C.V. & Prosser, C.D. (eds) The history of Geoconservation. The Geological Society, London, Special Publications, 300, p. 31-36.

GUERRA, A. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

GUIMARÃES, G. B.; MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F.; MELEK, P. R. 2007. **Geologia dos Campos Gerais**. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. 1. ed. Ponta Grossa: UEPG, cap. 2. p. 23- 32.

GUIMARÃES G. B.; MELO, M. S.; MOCHIUTTI N. F. 2009. **Desafios da geoconservação nos Campos Gerais do Paraná**. Geologia USP – Série

Publicação Especial, 5: 47-61.

GUPE, 2017. **Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais - ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação**. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE). Relatório técnico final. Ponta Grossa (PR).

HALLBERG, R. & FERRIS, F.G., 2004 - **Biomineralization by Gallionella**. Geomicrobiology Journal, 21(5): 325-330. https://doi.org/10.1080/01490450490454001.

HÄUSELMANN, P.; TOGNINI, P. **Kaltbach Cave (Siebenhengste, Switzerland): phantom of the sandstone?** Acta Carsologica 34/2 5, Ljubljana. 2005. p. 383-396.

HARDT, R. 2003. **Carste em arenitos: considerações gerais**. XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia. Januária MG. Anais. Sociedade Brasileira de Espeleologia. (sem páginas).

HARDT, R.; RODET, J. **O primocarste. um novo paradigma de carstificação e sua importância no carste não carbonático**. Anais do 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia. Rio de Janeiro / RJ. 2012 (sem páginas).

HARDT, R.; RODET, J.; PINTO, S.A.F. **O carste. Produto de uma evolução ou processo?** Evolução de um conceito. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, Set. 2010, p. 110-124.

HARDT, R. 2011. **Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias**. Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 224 p.

HÄUSELMANN, P.; TOGNINI, P.. **Kaltbach Cave (Siebenhengste, Switzerland): phantom of the sandstone?** Acta Carsologica 34/2 5, Ljubljana. 2005. p. 383-396

HERSMAN, L., LLOYD, T., & SPOSITO, G. (1995). **Siderophore-promoted dissolution of hematite**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(16), 3327-3330.

HERSMAN, L. E. **The role of siderophores in iron oxide dissolution. In: Environmental microbe-metal interactions**. American Society of Microbiology, 2000. p. 145-157.

HIJAZIN, C. A. H.; SIMÕES, A. T.; SILVEIRA, D. R. **Hidrólise ácida, alcalina e enzimática**. Revista Atitude - Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre. Ano IV. Número 7. 2010. p. 89-93.

HILL, C. A., FORTI, P., 1997 - **Cave Minerals of the World**. National Speleological Society, Huntsville, Alabama.

IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. 2007. **Portaria IAP (Instituto Ambiental do Paraná) nº 017, de 19 de janeiro de 2007**. Disponível em: http://celepar7.pr.gov.br/sia/atosnormativos/form_cons_ato1.asp?Codigo=1908. Acessado em: 18 de janeiro de 2018.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade & CECAV – Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. 2011. **Apostila do III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental.** Brasília/DF. 197p.

IESPA, A. A. C.; IESPA, C. M. D.; BORGHI, L., 2012 - **Evolução paleoambiental da Lagoa Salgada utilizando microbialitos, com ênfase em microfácies carbonáticas**. Geociências (São Paulo), 31(3): 371-380.

IGPLAN. Consultoria Ambiental. 2010. **Estudo Prévio de Impacto Ambiental PCH Castro**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1463.html. Acesso em 13 de agosto de 2019.

IG. Transmissão e Distribuição. 2015. **Relatório Ambiental Simplificado Linha de Transmissão LT 23KV Figueira/Ponta Grossa**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_RAS/RAS_FRA_Klacel_Final.pdf. Acesso em 17 de agosto de 2019.

ILER, R. K. 1979. **The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry**. John Wiley and Sons, New York, 1979. 866 p.

JANSEN, D. C.; CAVALCANTI, L. F. & LAMBLÉM, H. S.. **Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na Escala 1:2.500.000**. Revista Brasileira de Espeleologia, Brasília: CECAV, v. 2, n. 1, p. 42-57, 2012. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/revistaeletronica/index.php/RBEsp/article/view/255/pdf_255 . Acessado em: 16/07/2018.

JENNINGS, J. N.. **Sandstone pseudokarst or karst? In: Young, R. W.; Nanson,G. C. Aspects of Australian Sandstone Landscapes.** Wollongong: Australian ans New Zealand Geomorphology Group Special Publication no.1. 1983.

JOHANSSON, C. E., ANDERSEN, S. E ALAPASSI, M. 1999. **Geodiversity in the Nordic Countries**. ProGEO News, 1, 1- 3.

KARMANN, I. & SÁNCHEZ, L. E.. **Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil**. Espeleotema, Monte Sião, v. 13, p. 105-167, 1979.

KARMANN, I. & SÁNCHEZ, L. E.. **Speleological provinces in Brazil**. International Congress of Speleology. Anais... Barcelona: UIS. 1986.

KARMANN, I. **Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica**. In TEIXEIRA, W; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F.. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 114-136.

KAUFMANN O., BINI A., TOGNINI P. et QUINIF Y. 1999. **Étude microscopique d'une altérite de type fantôme de roche.** Études de géographie physique. Travaux 1999 – Suppl. XXVIII, Cagep, Université de Provence 129-134.

KAUFMANN, O.; DECEUSTER, J.. **Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods — an overview**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 17–26.

KLIMCHOUCK A. B.; NASEDKIN V. M.; & CUNNINGHAM K. I., 1997. **Speleothems of aerosol origin: reply**. Journal of Caves and Karst Studies, 59, 45-47.

KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C. **Types of karst and evolution of hydrogeologic Settings.** In: KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.) Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: National Speleological Society, 2000.

KLIMCHOUK, A. B., 2007. **Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective**. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico. 106 pp.

KLIMCHOUK, A., 2009.**Principal features of hypogene speleogenesis. Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins**. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, p. 7-15.

KLIMCHOUK, A., 2017. **Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification**. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), p. 79-105. https://doi.org/10.1144/SP466.11

KOZLOWSKI S. 2004. **Geodiversity. The concept and scope of geodiversity**. Przeglad Geologiczny, vol. 52, no. 8/2, p. 833-837.

KRAEMER, S. M. **Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores**. Aquatic sciences, v. 66, n. 1, p. 3-18, 2004.

LACTEC. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. 2014. **Estudo de Impactos Ambientais Complexo Eólico-Elétrico Campos Gerais**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1474.html. Acesso em 18 de agosto de 2019.

LAVERTY, M. **Preparing the ground – new mechanisms for karst and speleogenesis: 'altération', fantomisation and replacement**. Transactions of the British Cave Research Association. CAVE AND KARST SCIENCE, Vol.39, No.2, 2012. p. 72-76.

LEE, S. O.; et al. **Dissolution of iron oxide using oxalic acid**. Hydrometallurgy, v. 87, n. 3-4, p. 91-99, 2007.

LETENSKI R., GUIMARÃES G. B., PIEKARZ G. F., MELO M. S., 2009 - **Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução**. Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas. 2(1): 5-15.

LESTENSKI, R.; MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; PIEKARZ, G.F. 2011. **Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução**. In: CARPANEZZI, O.T.B.; CAMPOS, J.B., organizadores. Coletânea de pesquisas: Parque Estaduais de Vila Velha, Cerrado e Guartelá. p. 239-248.

LIMA, F.F., 2008. **Proposta Metodológica para a Inventariação do Patrimônio Geológico Brasileiro**. Tese de Mestrado em Patrimônio Geológico e Geoconservação, Universidade do Minho, Escola de Ciências, 91p.

LOBATO, G.; BORGHI, L. 2005. **Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em afloramentos da borda leste da Bacia do Paraná**. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, Salvador. Anais. Salvador: IBP, p.1-6.

LUNDBERG, J., BREWER-CARIAS, C., & MCFARLANE, D. 2010. **Preliminary results from U–Th dating of glacial–interglacial deposition cycles in a silica speleothem from Venezuela.** Quaternary Research, 74(1), 113-120. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.03.005.

MAACK, R. 1946a. **Geologia e geografia da região de Vila Velha e considerações sobre a glaciação carbonífera do Brasil**. Curitiba, Arquivos do Museu Paranaense, v.5, 305p.

MAACK, R. 1946b. **Notas preliminares sobre uma nova estratigrafia do Devoniano do Estado do Paraná**. In: Congresso Pan-Americano de Engenharia de Minas e Geologia, 2, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, v.4.

MAACK, R. 1956. **Fenômenos carstiformes de natureza climática e estrutural de arenitos do Estado do Paraná**. Arquivos de Biologia e Tecnologia 11: 151–162.

MACHADO, M. M. M.; RUCHKYS, Ú. A. **Valorizar e divulgar a geodiversidade: estratégias do Centro de Referência em Patrimônio Geológico (CRPG) MHNJB-UFMG**. Geonomos , v. 2, p. 53-56, 2010.

MAINGUET, M. **Le modelé des grès: Problèmes Généraux**. Paris: Institut Géographique National. 1972. 228 p.

MALTSEV V. A., 1997. **Speleothems of Aerosol Origin: Discussion**. Journal of Caves and Karst Studies, 59, 43-44.

MARESCAUX, M. G. **Les Grottes du Gabon nord-oriental : un Karst dans l'oxyde de fer et la silice.** Bulletin de l'Association de Géographes Français. Paris: 410, Juillet Octobre. 1973. p. 606-618.

MARTINI, J. E. J. **Karst in black reef quartzite near kaapsehoop, eastern transvaal**. Ann. South Afr. Geol. Surv. 13. 1979. p. 115-128.

MARTINI, J.E.J., 1982. **Karst in Black Reef and Wollenberg Group Quartzite of the Eastern Transvaal Escarpment**. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 10: 99-114.

MARTINS, J. C.; MARTINS, E. de S.; REATTO, A. **Revisão de intemperismo de micas**. Embrapa Cerrados. Documentos, 2004. 48 p.

MARTINS, S. B. M. P. **Levantamento dos recursos naturais do distrito espeleológico de Altinópolis-SP**. Relatório FAPESP, proc. 83/2552-3, Rio Claro-SP. 1985.

MARRA R. J. C., 2008. **Critérios de relevância para classificação de cavernas no Brasil**. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília

MASSUQUETO, L.L. 2010. **O sistema cárstico do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa - PR): caracterização da geodiversidade e de seus valores**. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

MASSUQUETO, L. L; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S., 2011. **Geossítio do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa, PR, Brasil): relevante exemplo de sistema cárstico nos arenitos da Formação Furnas**. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 22(1): pp 099-110

MAURICE, P. A.; VIERKORN, M. A.; HERSMAN, L. E.; FULGHUM, J. E.; FERRYMAN, A. 2001. **Enhancement of kaolinite dissolution by an aerobic Pseudomonas mendocina bacterium**. Geomicrobiology Journal 18(1): 21–35.

MELO, M. S.; COIMBRA, A. M. 1996. **Ruiniform relief in sandstones – the example of Vila Velha, Carboniferous of the Paraná Basin, Southern Brazil**. Barcelona, Acta Geológica Hispanica,31(4): 25-40.

MELO, M.S.; GIANNINI, P.C.F.; PESSENDA, L.C.R., 2000. **Gênese e evolução da Lagoa Dourada, Ponta Grossa, PR**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 21 (1/2), 17-31, p. 17-31.

MELO, M.S.. 2006. **Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 145p.

MELO, M. S.; BOSETTI, E. P.; GODOY, L. C.; PILATTI, F. 2007. **Vila Velha, PR: Impressionante relevo ruiniforme.** In.: SCHOBBENHAUS, C. /CAMPOS, D.A. / QUEIROZ, E.T. / WINGE, M. / BERBERT-BORN, M.. Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. p. 269-277.

MELO, M. S.; GIANNINI, P. C. F. 2007. **Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 32, p. 2149- 2164.

MELO, M. S. **Aquífero Furnas - urgência na proteção de mananciais subterrâneos em Ponta Grossa, PR**. In.: Anais do Seminário Internacional "Experiências de Agenda 21: Os desafios do nosso tempo". Ponta Grossa – PR – Brasil. 27 a 29 de Novembro de 2009. (sem paginas)

MELO, M.S. 2010. **Processos erosivos superficiais e subterrâneos em arenitos da Formação Furnas na região dos Campos Gerais do Paraná**. Relatório Resumido. CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 20p.

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

MELO, M. S., 2013. **Perfurações de cupins e geomorfogênese em arenitos paleozoicos da região dos Campos Gerais do Paraná**. Quaternary and Environmental Geosciences. 04(1-2), p. 25-33.

MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; CHINELATTO, A.L.; GIANNINI, P.C.; PONTES, H.S.; CHINELATTO, A.C.A.; ATENCIO, D. 2015. **Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences 63 (2015) 20-35. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.06.011.

METZ, V.; GANOR, J. 2001. **Stirring effect on kaolinite dissolution rate**. Geochimica and Cosmochimica Acta 65(20): 3475–3490.

MILANI, É. J., FRANÇA A. B., SCHNEIDER R. L.. 1994. **Bacia do Paraná**. Bol. Geoc. PETROBRÁS, 8:69-82.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES; L. A. E FRANÇA, A. B. (2007) **Bacia do Paraná**. IN: Cartas Estratigráficas - Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.

MILLER A.Z., PEREIRA M.F.C., CALAFORRA J.M., FORTI P., DIONÍSIO A., SAIZ-JIMENEZ C., 2014 - **Siliceous Speleothems and Associated Microbe-Mineral Interactions from Ana Heva Lava Tube in Easter Island (Chile)**. Geomicrobiology Journal. 31(3): 236–245. https://doi.org/10.1080/01490451.2013.827762.

MINEROPAR. 2007. **Relatório final: mapeamento geológico da folha de Ponta Grossa (1:100.000)**. 245p. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/mapeamento/Relatorio_Folha_Ponta_Grossa_2007.pdf. Acessado em: 30 de agosto de 2019.

MIOT, J.; BENZERARA, K.; KAPPLER, A.. 2014. **Investigating Microbe-Mineral interactions: Recent Advances in X-Ray and Electron Microscopy and Redox-Sensitive Methods**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2014. 42: 271–89

MMA – Ministério do Meio Ambiente. 2014. **Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente IN/MMA nº 03, de 01 de setembro de 2014**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/sisbio/images/stories/instrucoes_normativas/INSTRU%C3%87%C3%83O_NORMATIVA_ICMBio_N%C2%BA_3_DE_2014__com_retifica%C3%A7%C3%A3o_do_DOU18062015.pdf. Acessado em: 18 de janeiro de 2018.

MMA. Ministério de meio Ambiente. 2017. **Instrução Normativa MMA Nº 2, de 31 de agosto de 2017**. Disponível em: http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=01/09/2017&jornal=1&pagina=161&totalArquivos=208. Acesso em 13 de agosto de 2019.

MOCHIUTTI, N. F. B. & TOMAZZOLI, E. R.. **Espeleotemas de uma caverna granítica na Ilha de Santa Catarina: uma análise preliminar**. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017. Ouro Preto. Anais... Campinas: SBE, 2017. p. 327-333. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_327-333.pdf. Acesso em: 14 de agosto de 2019.

MOREIRA, J. C. (2012) **Interpretative Panels About the Geological Heritage – a Case Study at the Iguassu Falls National Park (Brazil)**. Geoheritage 4: 127-137. doi: 10.1007/s12371-012-0053-5

MOREIRA, J.C., 2012. **Interpretative Panels About the Geological Heritage – a Case Study at the Iguassu Falls National Park (Brazil)**. Geoheritage 4: 127-137. https://doi.org/10.1007/s12371-012-0053-5.

MOSS, D.F.; LOPEZ, M. R. Q.; FERREIRA, R. L., 2012. **Fauna de invertebrados em cavernas areníticas do município de Ponta Grossa – PR**. Trabalho de conclusão de curso – Bacharelado em Biologia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

MOURA, V. **Prospecção espeleológica, topografia e espeleometria de cavernas. In.: III Curso de Espeleologia e licenciamento Ambiental**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio); Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). 2011. p. 45-71. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

NASCIMENTO, A. L. do N.; MANSUR, K. L; MOREIRA, J. C**. Bases conceituais para entender geodiversidade, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo**. 2015. Disponível em < www.ojs.ufpi.br/index.php/equador/article/download/3643/2119> Acesso em 18 de janeiro de 2018.

NIETO, L. M. 2001. **Geodiversidad: propuesta de una definición integradora**. Boletín Geológico y Minero- España, Vol. 112, No 2, p. 3-12.

NIETO, L. M. 2002. **Patrimonio Geológico, Cultura y Turismo**. Boletín del Instituto de Estudios Giennenses, No 182, p. 109-122.

OLIVEIRA, E. P. (1912) **O terreno devoniano do sul do Brasil**. IN: Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, vol. 14, pp. 31-41.

OLIVEIRA-GALVÃO, A. L. C.; JANSEN, D. C.; LIMA, M. F. 2009. **Regiões cársticas do Brasil**. CECAV/Instituto Chico Mendes. Brasília. Disponível em http://www4.icmbio.gov.br/cecav/index.php?id_menu=362. Acessado em 17 de janeiro de 2018.

PALMER, A. N., 2007. **Cave geology and speleogenesis over the past 65 years: role of the National Speleological Society in advancing the science**. Journal of Cave and Karst Studies, 69(1): 3–12.

PANIAS, D.; TAXIARCHOU, M.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A. **Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions**. Hydrometallurgy, v. 42, n. 2, p. 257-265, 1996.

PARELLADA, C. I. **Províncias Espeleológicas Paranaenses: uma revisão**. In: Rasteiro, M.A. & Santos-Neto, C.J.. (orgs.) CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 20, 1989. Brasília. Anais... Campinas: SBE, 2017. p.9-16. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais20cbe/20cbe_009-016.pdf. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

PASINI, G.A., 2009. **terminological matter: paragenesis, antigravitative erosion or antigravitational erosion?** International Journal of Speleology 38 (2). Bologna (Italy), p. 129-138.

PAVAN, B. H. **Sistemas fluviais de grandes dimensões: uma reinterpretação da Formação Furnas no Cânion Guartelá-PR**. Trabalho de conclusão de curso de Geologia na Universidade Estadual de Campinas. 2015. 45p.

PEREIRA, P. J. S., 2006. **Património geomorfológico: conceptualização, avaliação e divulgação. Aplicação ao Parque Natural de Montesinho**. Tese de Doutoramento em Ciências. Universidade do Minho, Portugal, 370p.

PEREIRA, R. F.; BRILHA, J.; MARTINEZ, J. E. (2008) **Proposta de enquadramento da geoconservação na legislação ambiental brasileira.** In: Memórias e Notícias da Conferência Internacional: As Geociências no Desenvolvimento das Comunidades Lusófanas. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Minerol. Geol., Univ. Coimbra. 3: 491-494

PEREIRA, R .G. F. A. **Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia-Brasil).** 2010, 317 f. Tese de Doutorado em Ciências – Especialidade em Geologia. Universidade do Minho Portugal. 2010.

PETRI, S. 1948. **Contribuição ao Estudo do Devoniano Paranaense**. Rio de Janeiro. Boletim 129, DNPM/DGM. 125p.

PILÓ, L. B. & AULER, A. S. **Introdução à Espeleologia**. In.: III Curso de Espeleologia e licenciamento Ambiental. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio); Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). 2011. p. 7-23. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2004. **Lei nº 7.636, de quatro de junho de 2004**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=7.636. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2005. **Decreto nº 568, de dezessete de novembro de 2005**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=568%2F2005. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2006. **Lei nº 8.473, de dois de março de 2006**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=8.473. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2010. **Lei nº 10.417, de 17 de novembro de 2010**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=10.417. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2012. **Lei nº 11.233, de 27 de dezembro de 2012**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=11.233%2F2012. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2013. **Decreto nº 8.060, de 03 de dezembro de 2013**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&q=8060%2F2013. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2015a. **Lei nº 12.128, de 27 de dezembro de 2015**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=+12.128. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2015b. **Lei nº 12.192, de 25 de junho de 2015**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12.192. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2015c. **Lei nº 12.342, de 15 de dezembro de 2015**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12.342. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2015d. **Lei nº 12.345, de 20 de novembro de 2015**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=28&q=12345%2F2015. Acesso em 18 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2016. **Decreto nº 10.996, de 01 de fevereiro de 2016**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=10.996. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2018a. **Decreto nº 13.957, de 17 de janeiro de 2018**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=13.957. Acesso em 13 de agosto de 2019.

PMPG. Prefeitura Municipal de Ponta Grossa. 2018b. **Decreto nº 14.085, de 20 de fevereiro de 2018**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/prefeitura/pr/pontagrossa?o=&types=5&q=14.085. Acesso em 18 de agosto de 2019.

PONTES H.S., ROCHA H.L., MASSUQUETO L.L., MELO M.S., LOPES M.C., GUIMARÃES G.B., 2008 - **Mudanças recentes na circulação subterrânea do Rio Quebra-Pedra (furna do Buraco do Padre, Ponta Grossa, PR)**. In: anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia.

PONTES, H.S.; ROCHA, H. L.; MASSUQUETO, L. L.; et al., 2010. **Mudanças recentes na circulação subterrânea do rio Quebra- Pedra (furna do Buraco do Padre, Ponta Grossa, Paraná)**. Espeleo-Tema: Campinas, SBE. 21(1): pp 7-16

PONTES, H. S. 2010. **Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, Paraná. Exemplo de Relevo Cárstico na Formação Furnas**. Monografia (Graduação em Bacharelado em Geografia) – Setor de Ciências Exatas e Naturais. UEPG.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., BUDNY, J.M, 2012 - **Gruta Cambiju: importante geossítio nos arenitos da Formação Furnas, Município de Ponta Grossa, Campos Gerais do Paraná**. In: Anais do 46º Congresso Brasileiro de Geologia.

PONTES, H.S. 2014. **Espacialização de feições cársticas da Formação Furnas: ferramenta para gestão do território no Município de Ponta Grossa (PR)**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 163p.

PONTES, H.S.; MASSUQUETO, L.L. **Riscos eminentes ao patrimônio cárstico não carbonático dos Campos Gerais do Paraná: conflitos na conceituação, lacunas na legislação ou negligência?** Anais do XI Simpósio Nacional de Geomorfologia – SINAGEO. Maringá. 2016. Disponível em: http://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/9/9-499-133.html. Acessado em 12/02/2018.

PONTES, H. S., 2016. **Patrimônio geológico cárstico em rochas areníticas e políticas públicas de geoconservação, com base em estudo de caso do município de Ponta Grossa (PR).** In: anais do 19º Seminário do Programa de Pós-Graduação em Geologia UFPR. Curitiba. pp 22-22.

PONTES, H. S., 2017. **Feições cársticas em arenitos da Formação Furnas e no Arenito Vila Velha da Formação Campo Mourão e suas implicações em políticas públicas de geoconservação**. In: anais do 20º Seminário do Programa de Pós-Graduação em Geologia UFPR. Curitiba. pp 128-130.

PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L. **Geodiversidade e políticas públicas: um estudo de casos nos Campos Gerais do Paraná**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO, 4., ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO, 2., 2017, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: GUPE, 2017. p. 254-258.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., GUIMARÃES G.B., MOCHIUTTI N.F.B., 2017 - **Patrimônio espeleológico do município de Tibagi, Campos Gerais do Paraná**. In: Rasteiro M.A., Teixeira-Silva C.M., Lacerda S.G. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 34. Ouro Preto. Anais... Campinas: SBE, 417-426.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., FOLTRAN A.C., PONTES F.S., GUIMARÃES G.B., MOCHIUTTI N.F.B., GUIMARÃES S.K., BURGARDT S., DO VALE T.F., FEITOSA N.M.N., 2018a - **Patrimônio espeleológico do Parque Nacional dos Campos Gerais: Ações prioritárias para o manejo e propostas de ampliações da Unidade de Conservação**. Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas - GUPE - Ponta Grossa. 61 p. Disponível em: https://issuu.com/gupe.espeleo/docs/patrim_nio_espeleol_gico_do_parque_. Acesso em 15 de agosto de 2019.

PONTES H.S., MASSUQUETO L.L., FERNANDES L.A., FOLTRAN A.C., MELO M.S., MOREIRA J.C., 2018b - **Caves geodiversity evaluation as an instrument to the management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil**. Geoheritage, 10(1):1-11. https://doi.org/10.1007/s12371-018-0317-9.

PRESS, F; SIEVER R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Intemperimo e erosão**. In: Para Entender a Terra. Tradução Rualdo Menegat, 4 ed. – Porto Alegre: bookman, 2006. p. 170-192.

QUINIF, Y. **Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification.** Etudes de géographie physique, Travaux - Supplement 18. University of Provence. 1999. p. 159–164.

QUINIF, Y.; BRUXELLES. L.. **L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification 'Ghost rock' weathering: processes, evolution and implications for the karstification**. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2011, n° 4, p.?.

QUINIF, Y.; BAELE, J., M.; DUBOIS, C.; HAVRON, C.; KAUFMANN, O.; VERGARI, A.. **Fantômisation: un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistasie d'Erhard.** Geol. Belg. 17. 2014. p. 66–74.
RENAULT, P. 1953. **Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional.** Anais I Congrès International de Spéléologie. p. 275-289.

RECITECH. Consultoria Ambiental. 2016. **Relatório Ambiental Simplificado CGH São João**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_RAS/CGH_Sao_Joao_CGH_PCA.pdf. Acesso em 18 de agosto de 2019.

RESITEC. Consultoria Ambiental. 2007. **Estudo de Impactos Ambientais Central de Tratamento de Resíduos Furnas (CTR/Furnas)**. (sem páginas).

RIECHELMANN D.F.C., FOHLMEISTER J., TJALLINGII R., JOCHUM K.P., RICHTER D.K., BRUMMER G.J.A., SCHOLZ D., 2016 - **Detection and origin of different types of annual laminae in recent stalagmites from Zoolithencave, southern Germany: Evaluation of the potential for quantitative reconstruction of past precipitation variability**. Climate of the Past Discussion, 1-42. https://doi.org/10.5194/cp-2016-18.

RODET, J. **Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies: le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansionnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France)**. C. R. Acad. Sci. III 322. 1996. 1039–1045.

RODET, J.. **The primokarst, former stages of karstification, or how solution caves are born**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 58–65.

RODET J. 2017. **The cave: a result of a long evolution named karstification - a conceptual approach**. In. 26th International Karstological School, Postojna, abstract: 48-49.

RODRIGUES, M. L.; FONSECA, A. **A valorização do geopatrimónio no desenvolvimento sustentável de áreas rurais**. Comunicação apresentada no VII CIER – Cultura, Inovação e Território. Lisboa – Portugal. 2008. Sem páginas.

ROMANÍ, J. R. D.; RODRIGUEZ, M. V. **Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution**. Nature Conservation 63: 41-46. 2007.

ROSA, D. R. **As Jazidas de Opalas Nobres da Região de Pedro II no Estado do Piauí**. Jundiaí, Paco Editorial: 2014. 224 p.

ROWBERRY, M.D.; BATTIAU-QUENEY, Y.; WALSH, P.; BŁAŻEJOWSKI, B.; BOUT-ROUMAZEILLES, V.; TRENTESAUX, A.; KŘÍŽOVÁ, L.; GRIFFITHS, H.. **The weathered Carboniferous limestone at Bullslaughter Bay, South Wales: the first example of ghost-rock recorded in the British Isles**. Geol. Belg. 17. 2014. p. 33–42.

SALLSTEDT T., IVARSSON M., LUNDBERG J., SJÖBERG R., ROMANÍ J.R.V., 2014 - **Speleothem and biofilm formation in a granite/dolerite cave, Northern Sweden**. International Journal of Speleology, 43: 305-313. http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.7.

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

SAURO, F. **Speleogenesis and secondary cave minerals in quartz-sandstone and quartzite environment**. Tese de Doutorado. Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. 2014. 254p.

SAURO, F.; CAPPELLETTI, M.; GHEZZI, D.; COLUMBU, A.; HONG, P. Y.; ZOWAWI, H. M.; CARBONE, C; PICCINI, L; VERGARA, F; ZANNONI, D; DE WAELE, J.. 2018. **Microbial diversity and biosignatures of amorphous silica deposits in orthoquartzite caves**. Scientific reports, 8(1), 17569. https://doi.org/10.1038/s41598-018-35532-y

SALVAN, H. M. **Un problême d'actualité: la sauvegarde du patrimoine géologique. Quelquesréflexions**. Symposiu, International Sur La Protection du Patrimoine Geologique, Digne Les Bains, 1994. Mémoire, n.s, n.165, p. 229-230.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 28. Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, SBG, v.I, p. 41-65.

SCHWERTMANN, U. **Solubility and dissolution of iron oxides**. Plant and soil, v. 130, n. 1-2, p. 1-25, 1991.

SHADE, B. L.. **The Genesis and Hydrogeology of a Sandstone Karst in Pine County, Minnesota** [master's thesis]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 2002. 171 p.

SHARPLES, C.. 1993. A **Methodology for the Identification of Significant Landforms and Geological Sites for Geoconservation Purposes**; Report to Forestry Commission, Tasmania.

SHARPLES, C. 2002. **Concepts and principles of geoconservation**. Published electronically on the Tasmanian Parks & Wildlife Service website. Disponível em: http://dpipwe.tas.gov.au/Documents/geoconservation.pdf. Acessado em 18 de janeiro de 2018.

SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R. B. **Caracterização das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na região sul do estado de Mato Grosso**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 33, n. 2, p.261-277, 2014.

SILVA, M. D.. **Gênese e evolução das cavernas marinhas do maciço costeiro do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC)**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. 2018. 238p.

SMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2017a. **Instrução Normativa SMMA n° 1-001/2017**. Disponível em:

https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/1-extracao-mineral/1.1-cascalheira/1.001-geral/IN_LA_1-001_2017-SMMA.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2017b. **Instrução Normativa SMMA n° 1-002/2017**. Disponível em: https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/1-extracao-mineral/1.2-extracao-de-pedras-irregulares-de-modo-artesanal/1.002-geral/IN_LA_1-002_2017-SMMA.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2017c. **Instrução Normativa SMMA n° 2-001/2017**. Disponível em: https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/2-atividades-agropecuarias-e-silviculturais/2.1-suinocultura/IN_LA_2-001_2017-SMMA.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2017d. **Instrução Normativa SMMA n° 10-001/2017**. Disponível em: https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/10-empreendimentos-imobiliarios/10.1-loteamentos/IN_LA_10-001_2017-SMMA.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SMMA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 2017e. **Instrução Normativa SMMA n° 10-002A/2017**. Disponível em: https://smma.pontagrossa.pr.gov.br/download/licenciamento/10-empreendimentos-imobiliarios/10.2-implantacao-de-conjuntos-habitacionais/10.2A-conjunto-habitacional-geral/IN_LA_10-002A_2018-SMMA.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SOARES, O. 1988. **Furnas dos Campos Gerais (Paraná): depressões pseudocársticas.** Anais do 1°Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, Instituto de Educação de Minas Gerais - Belo Horizonte. p. 40-54.

SOARES, O. 1989. **Furnas dos Campos Gerais, Paraná.** Curitiba: Scientia et Labor - XVII, 82 p.

SØGAARD E.G., ARUNA R., ABRAHAM-PESKIR J., KOCH C. B., 2001 - **Conditions for biological precipitation of iron by Gallionella ferruginea in a slightly polluted ground water**. Applied Geochemistry, 16(9-10): 1129-1137. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00014-2.

SOMA. Consultoria Ambiental. 2011. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Telêmaco Borba**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1463.html. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SOMA. Consultoria Ambiental. 2013. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Tibagi Montante**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1461.html. Acesso em 13 de agosto de 2019.

SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P. 2000. **O ecarpamento estrutural Furnas na região S-SE do Brasil**. In: Schobbenhaus,C.; Campos,D.A.; Queiroz,E.T.; Winge,M.; Berbert-Born,M. (Edit.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Disponível em: http://www.unb.br/ig/sigep/sitio080/sitio080.htm. Acessado em: 29/01/2018.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L., 2015. **Cave Conservation Priority Index to Adopt a Rapid Protection Strategy: A Case Study in Brazilian Atlantic Rain Forest.** Environmental Management, 55:279-295. https://doi.org/10.1007/s00267-014-0414-8.

SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R.L., 2016. **The first two hotspots of subterranean biodiversity in South America**. Subterranean Biology 19: 1-21. https://doi.org/10.3897/subtbiol.19.8207.

SPINARDI R.D., LOPES M.C., 1990 - **Levantamento espeleológico da caverna das Andorinhas – PR 052**. In: Anais do IV Seminário de Pesquisa. Guarapuava. UNICENTRO: 39-40.

SPOLADORE, A.. 2005. **Novas cavernas em arenito no Estado do Paraná**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Espeleologia. Vol. 28. p. 125-135.

SPONHOLZ, B.. **Phénomènes karstiques dans les roches siliceuses au Niger Oriental**. Karstologia N° 23, 1/1994: 23-32.

STAFFORD, K. W.; NANCE, R.; ROSALES-LAGARDE, L; BOSTON, P. J., 2008. **Epigene and Hypogene Gypsum Karst Manifestations of the Castile Formation: Eddy County, New Mexico and Culberson County, Texas, USA**. International Journal of Speleology. 37 (2). Bologna (Italy). p. 83-98.

STANLEY, M. **Geodiversity**. Earth Heritage, Londres, v.14: p. 15-18, 2000.

SCHOTT, J.; OELKERS, E. H. 1995. **Dissolution and crystallization rates of silicate minerals as a function of chemical affinity**. Pure and Applied Chemistry 67(6): 903–910.

STRIEBEL, T., SCHÄFERJOHANN, V.. **Karstification of sandstone in Central Europe: attempts to validate chemical solution by analyses of water and precipitates**. In: Proc. 12th Intern. Congress of Speleology, 1997, Switzerland, Vol. 1, 473 – 476.

SUCHÝ, V.; SÝKOROVÁ, I.; ZACHARIÁŠ, J.; FILIP, J.; MACHOVIČ, V.; LAPČÁK, L. 2017. **Hypogene features in sandstones: an example from Carboniferous basins of centralwestern Bohemia, Czech Republic**. In: KLIMCHOUK, A., PALMER, A., DE WAELE, J., AULER, A. & AUDRA, P. (eds) Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer International, Berlin, 313–328.

SUTHEIME, S. H.; MAURICE, P. A.; ZHOU, Q. 1999. **Dissolution of well and poorly crystallized kaolinites: Al speciation and effects of surface characteristics**. American Mineralogist 84: 620–628.

TAXIARCHOU, M.; PANIAS, D.; DOUNI, I.; PASPALIARIS, I.; KONTOPOULOS, A. **Dissolution of hematite in acidic oxalate solutions**. Hydrometallurgy, v. 44, n. 3, p. 287-299, 1997.

THEODOROVICZ, A.; THEODOROVICZ, A.M.G.. **Geodiversidade: adequabilidades e limitações ao uso e ocupação**. In. SILVA, C.R.. Geodiversidade do Brasil. Conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, p. 205-264

TITANIUM. Consultoria Ambiental. 2015. **Estudo de Impactos Ambientais UHE Santa Branca**. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1497.html. Acesso em 13 de agosto de 2019.

TOLEDO, M. C. M; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. 2000. **Intemperismo e formação de solos**. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. ed. Decifrando a Terra (capítulo 8). São Paulo, Oficina de Textos. p.139-166.

TRAJANO, E; BICHUETTE, M. E., 2010. **Relevância de cavernas: porque estudos ambientais espeleobiológicos não funcionam**. Espeleo-Tema: Campinas, SBE, 21(1). 105-112.

TRUEBA, J. J. G.; CAÑADAS, E. S., 2008. **La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al Parque Nacional de Los Picos de Europa**. Boletín de la A.G.E. N.º 47 - 2008, 175-194

UFPR – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Manual de normalização de documentos científicos de acordo com as normas da ABNT**. Org. Maria Simone Utida dos Santos Amadeu et. al.. Curitiba: Ed. UFPR, 2017. 327 p.

URBANI, F. **Algunos comentários sobre terminologia karstica aplicada a rocas siliceas.** Bol. Soc. Venezolana Espel. (24). 1990. p. 5 – 6.

VASCONCELOS, A. M. C. 2014. **O criptocarste como interface entre o solo e o substrato rochoso: comparação entre os ambientes siliciclástico e o carbonático na região entre Rodeador e Diamantina-MG**. Tese de doutorado Universidade Federal de Minas Gerais. 150p.

VERGARI, A., QUINIF, Y. **Les paléokarsts du Hainaut**. Geodin. Acta 10, 1997. p. 175–187.

VESELY F. F., TRZASKOS-LIPSKI B., KRAFT R. P., ROSTIROLLA S. P., APPI C. J. 2003. **Facies architecture of a Permocarboniferous sandstone reservoir analogue, Itararé Group, Paraná Basin, Brazil**. In: Latin American Congress of Sedimentology, 3, Anais...

VESELY F. F.; ASSINE M. L. 2004. **Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 34:219-230.

VESELY, F. F. 2011. **Sulcos de origem glacial em arenitos neocarboníferos do Parque Estadual de Vila Velha, sudeste do Paraná**. Geociências (São Paulo. Impresso), v. 30, p. 589-599.

VIDAL ROMANÍ J.R., SANJURJO SÁNCHEZ J., VAQUEIRO M. & FERNÁNDEZ MOSQUERA D., 2010 - **Speleothems of granite caves**. Comunicações Geológicas, 97: 71-80.

VIDAL ROMANÍ J.R., VAQUEIRO RODRÍGUEZ M., SANJURJO SÁNCHEZ J., GONZÁLEZ LÓPEZ L. 2014 - **Morphologic types of speleothems in magmatic rock caves**. In: Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 490-493.

WEBB J. A., FINLAYSON B. L., 1984 - **Allophane and opal speleothems from granite caves in south-east Queensland**. Australian Journal of Earth Science. 31: 341–349.

WERNICK, E.; PASTORE, E. R. B.; PIRES NETO, A. **Cavernas em Arenitos**. Notícias Geomorfológica, 13. (26): 55 – 67, 1976.

WHITE, W. R.; JEFFERSON, G. L.; HAMAN, J. F. **Quartzite karst in southeastern Venezuela.** Speleology II. 1966. p. 309 – 314.

WILLEMS, L. **Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, dês gneiss et des granites em Afrique sahélienne et équatoriale.** Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique. 2000. 257 p.

WILLEMS L.; RODET J.; POUCLET A.; MELO S.; RODET M. J.; COMPÉRE P. H.; HATERT F.; AULER A. A. **Karst in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil.** Cadernos Lab. Xeólóxico de Laxe. Belgium: Corunã. 33. p.127-138. 2008.

WRAY, R.A.L., 1997. **A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones**. Earth Sci. Rev. 42, 137-160.

WRAY R. A. L., 1999 - **Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia**. Australian Journal of Earth Sciences, 46(4): 623–632. https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.1999.00732.x.

WRAY, R. A. L. **Quartzite dissolution: karst or pseudokarst?** Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, p. 1- 9, abr. 2003.

WRAY, R. A. L.. **Phreatic drainage conduits within quartz sandstone: Evidence from the Jurassic Precipice Sandstone, Carnarvon Range, Queensland, Australia**. Geomorphology 110. 2009. p. 203–211.

WRAY, R.A.L., 2013. **Solutional weathering and karstic landscapes on quartz sandstones and quartzite**. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, Karst Geomorphology, p. 463–483.

WRAY, R. A. L.; SAURO, F. **An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites**, Earth-Science Reviews (2017), doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.008

YOUNG, R.. **Tower karst in sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia.** Z. Geomorph. N.F. 30(2): 1986. 189-202.

YOUNG, R. W. **Quartz etching and sandstone karst: Examples from the East Kimberleys, northwestern Australia**. Zeitschrift fur Geomorphologie 32: 1988. 409-423.

YOUNG, R.W.; WRAY, R.A.L.; YOUNG, A.R.M., 2009. **Sandstone Landforms**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 314p.

ZALÁN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C. D. J., VIEIRA, I. S., & ASTOLFI, M. A. M. (1987). **A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 17, 243.

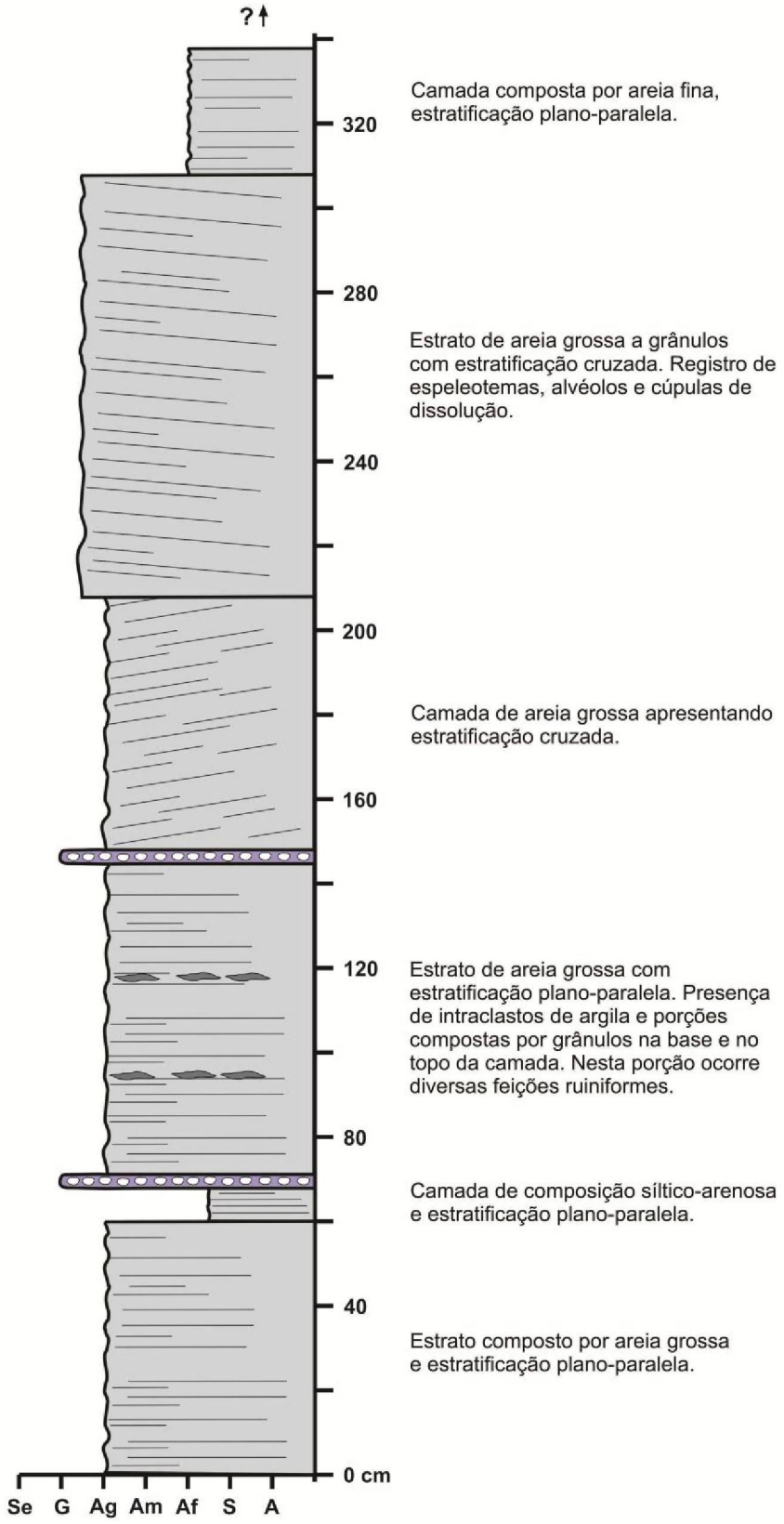
ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. 1990. **Bacia do Paraná**. In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. Origem e evolução de Bacias Sedimentares. 2. ed. Rio de Janeiro: Gávea. Cap. Bacia do Paraná. p. 135- 168.

ZEPEDA MENDOZA M.L., LUNDBERG J., IVARSSON M., CAMPOS P., NYLANDER J.A.A., SALLSTEDT T., DALEN L., 2016 - **Metagenomic Analysis from the Interior of a Speleothem in Tjuv-Ante's Cave, Northern Sweden**. PLoS ONE, 11(3): 1-23. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151577.

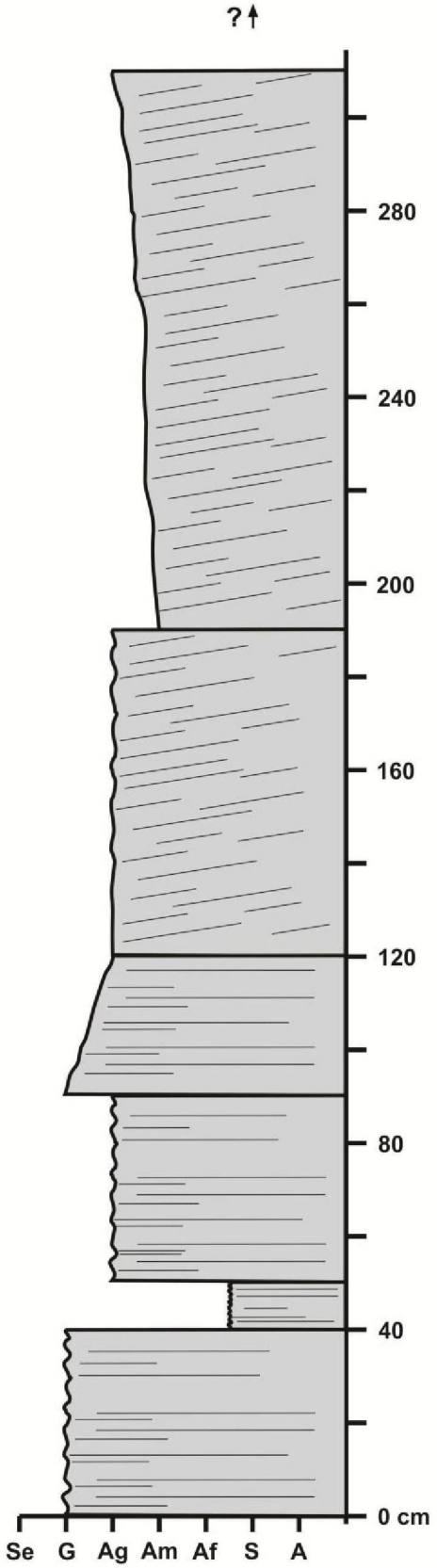
ZHILEI S., JUN L., ZHIXUE S., WEI H., RUYONG C., JIWEI L., 2010 - **Formation Mechanism of Biogenic Fe-Si Oxide Deposits in Seafloor Hydrothermal Systems**. Advances in Earth Science, 25(12): 1325-1336.

ANEXOS

Seção geológica Abrigo do Trono



Seção geológica afloramento na frente do Macarrão



Estrato composto por areia média na base com granocrescência ascendente para areia grossa. Estratificação cruzada. Alvéolos ocorrem seguindo a orientação imposta pela estrutura sedimentar.

Presença de areia grossa apresentando estratificação cruzada. As feições cársticas presentes nas camadas debaixo se estendem também neste estrato.

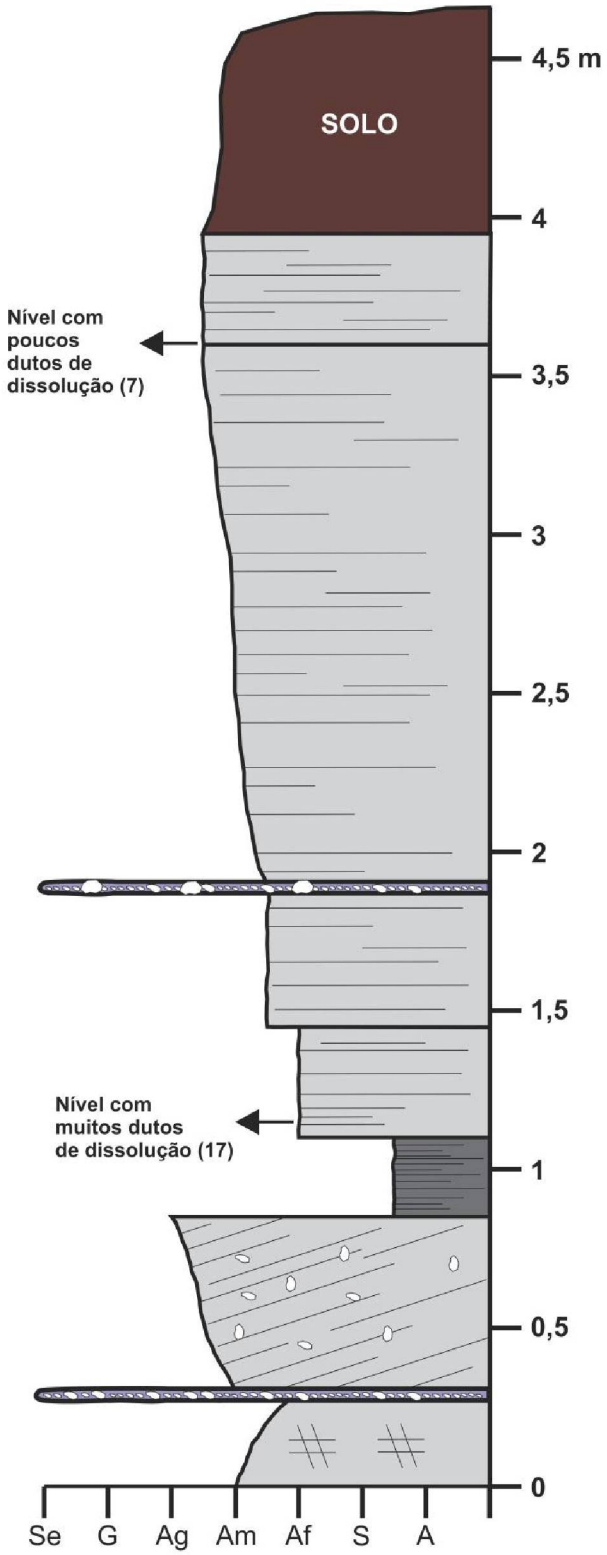
Estrato apresentando granodecrescência ascendente de grânulo para areia grossa, com estratificação plano-paralela. Também apresenta alvéolos, canais de parede e dutos de dissolução.

Camada de areia grossa com estratificação plano-paralela. Presença de alvéolos, canais de parede e dutos de dissolução.

Camada de composição síltico-arenosa e estratificação plano-paralela. Nesta porção ocorrem inúmeras formas ruiniformes, incluindo perfurações na rocha.

Estrato composto por grânulos, com estratificação plano-paralela.

Seção geológica Contorno Leste



Areia média a grossa com estratificação plano-paralela. No plano de acamamento, na interseção entre os dois estratos ocorrem alguns dutos ativos, formando nascentes.

Arenito apresentando granocrescência ascendente e estratificação plano-paralela.

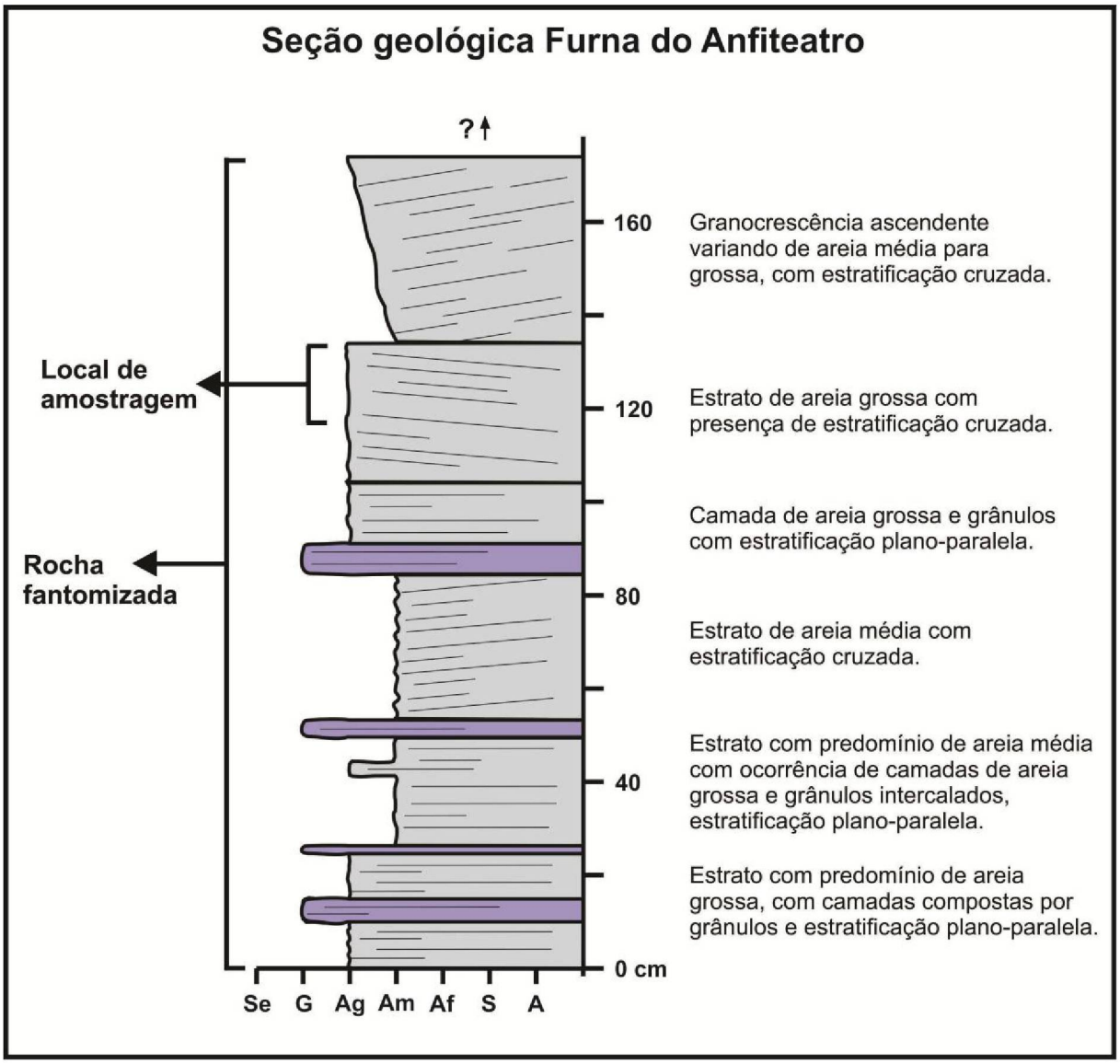
Areia fina a média, estratificação plano-paralela. Pequena camada de seixos no topo, mal selecionados, com registros de blocos de até 7 cm.

Presença de areia fina com estratificação plano-paralela, na base deste estrato ocorrem diversos dutos ativos, formando nascentes.

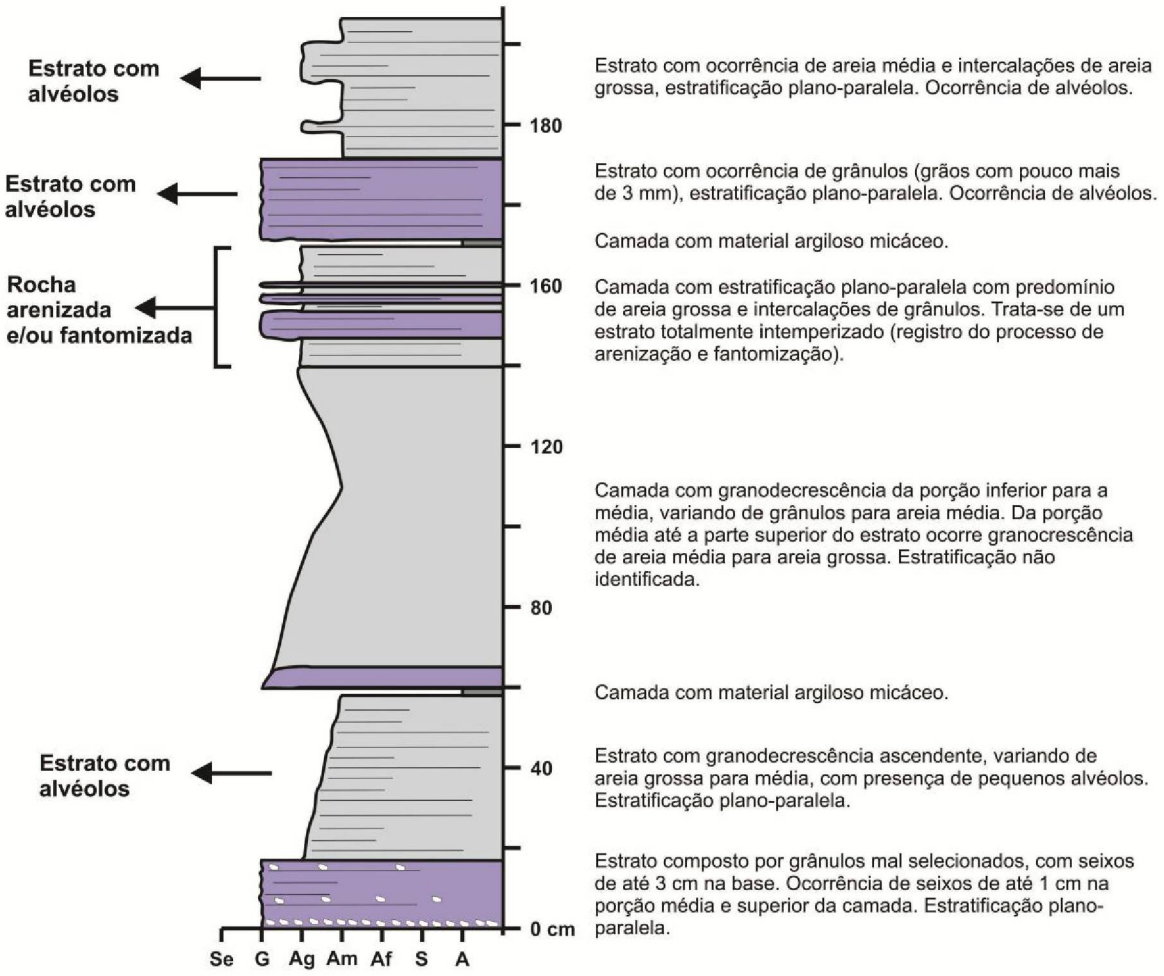
Camada com material síltico-argiloso com estratificação plano-paralela e presença de minerais micáceos.

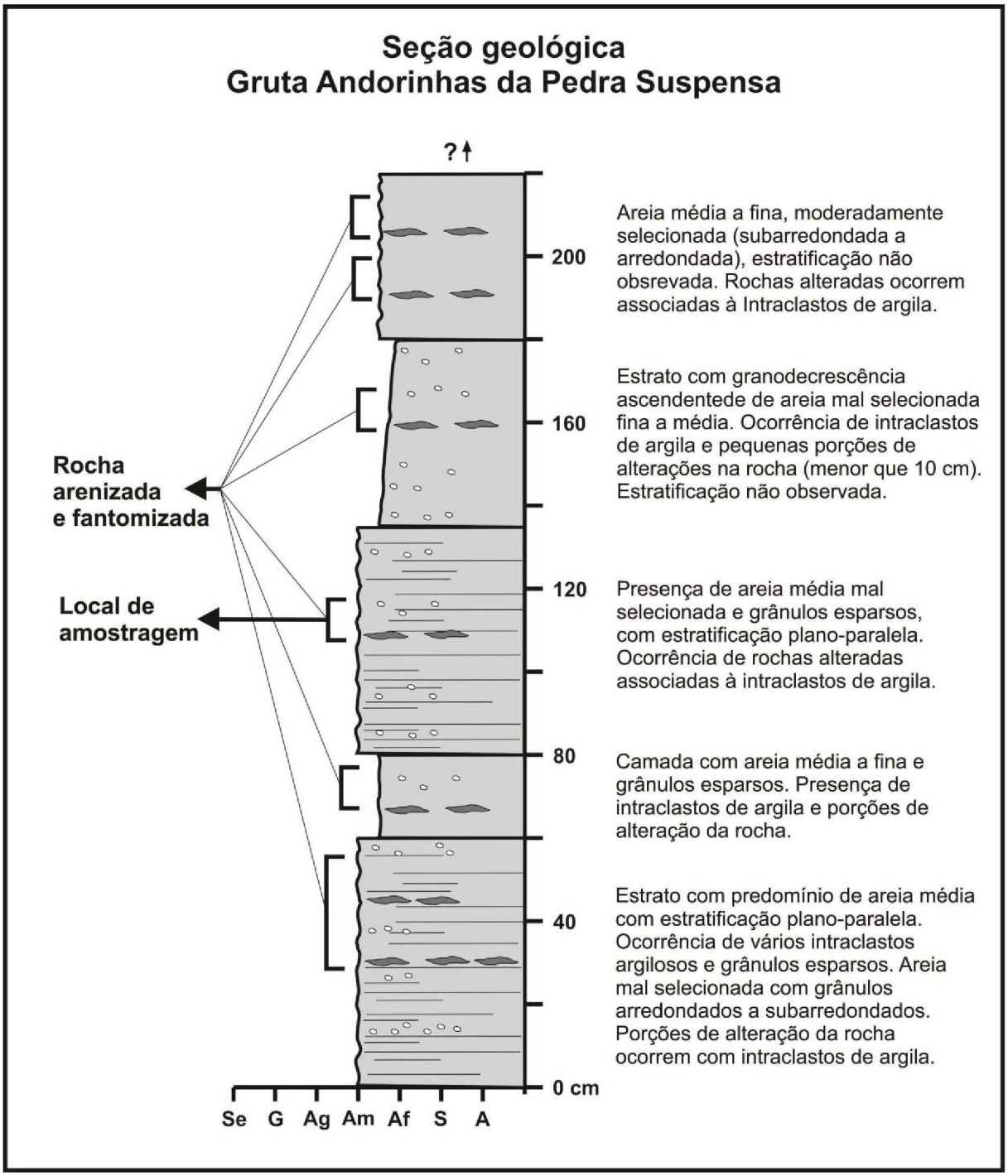
Granocrescência ascendente com presença de seixos irregulares esparsos de até 3,5 cm, estratificação cruzada plano-paralela.

Granodecrescência ascendente com camada de seixos no topo, mal selecionados, de até 3 cm e intraclastos argilosos, estratificação não identificada.

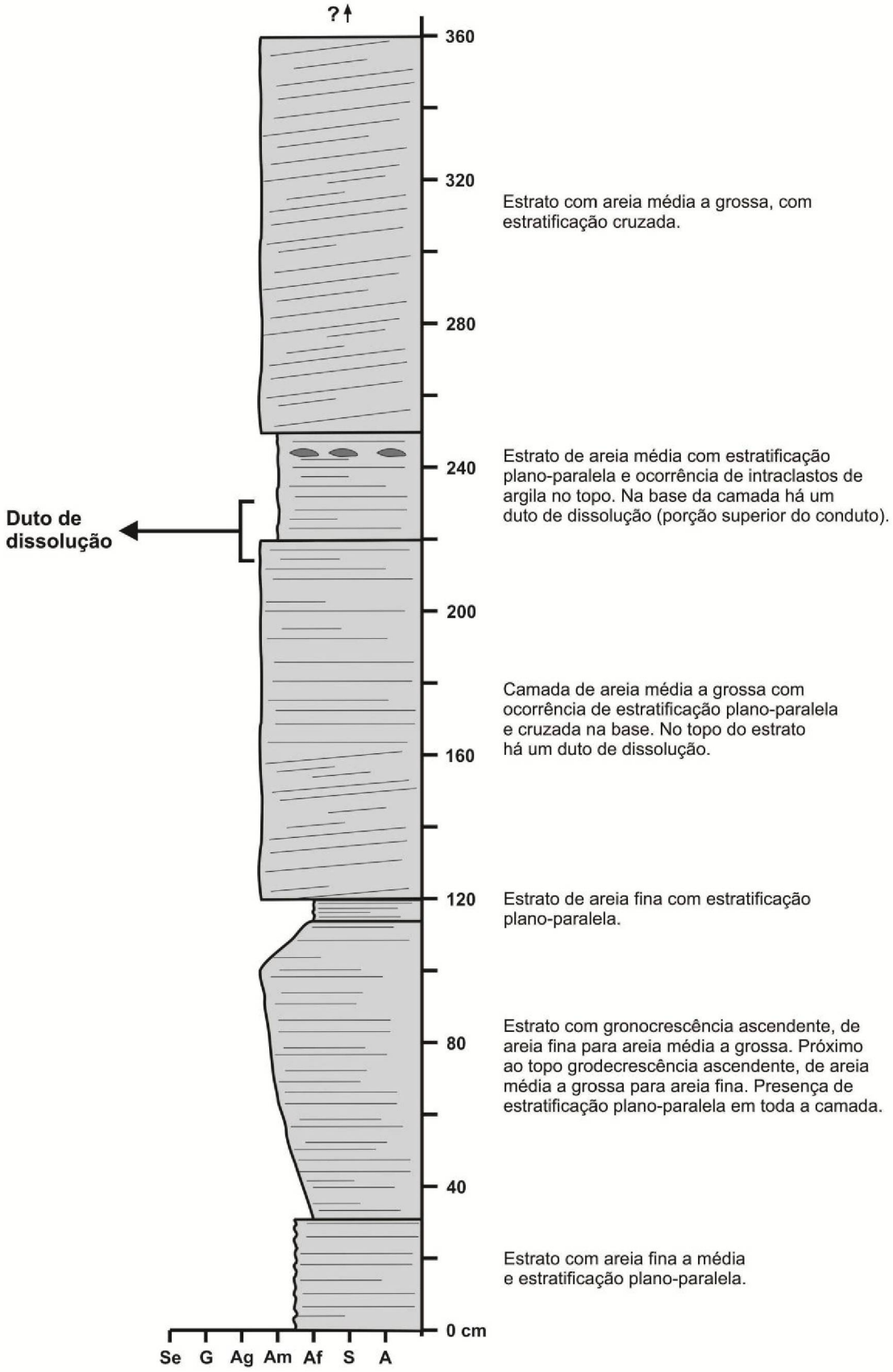

Seção geológica Furna do Anfiteatro
?
160
120
80
40
0 cm
Local de amostragem
Rocha fantomizada
Se G Ag Am Af S A
Granocrescência ascendente variando de areia média para grossa, com estratificação cruzada.
Estrato de areia grossa com presença de estratificação cruzada.
Camada de areia grossa e grânulos com estratificação plano-paralela.
Estrato de areia média com estratificação cruzada.
Estrato com predomínio de areia média com ocorrência de camadas de areia grossa e grânulos intercalados, estratificação plano-paralela.
Estrato com predomínio de areia grossa, com camadas compostas por grânulos e estratificação plano-paralela.

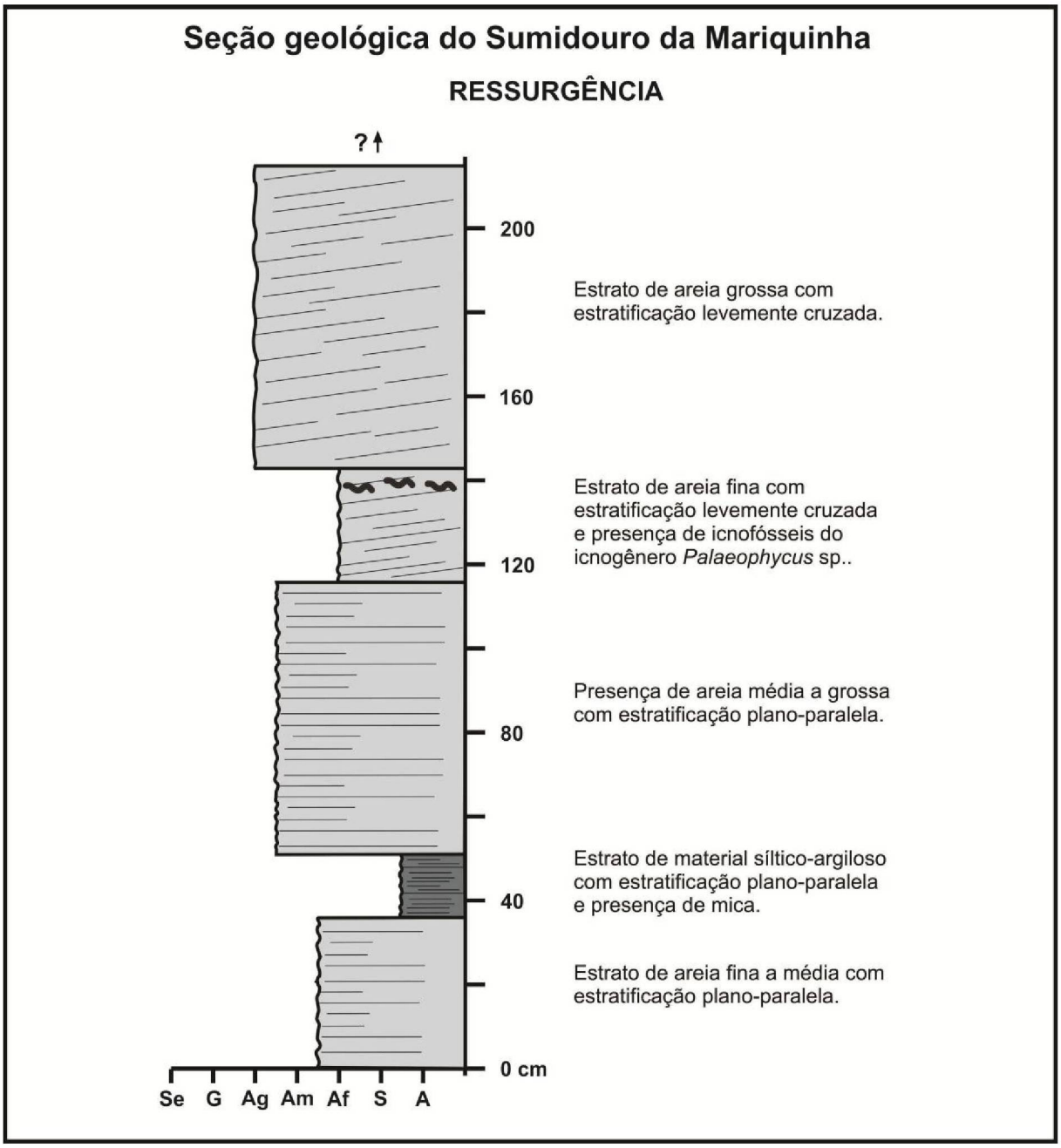
Seção geológica Furnas Gêmeas 1



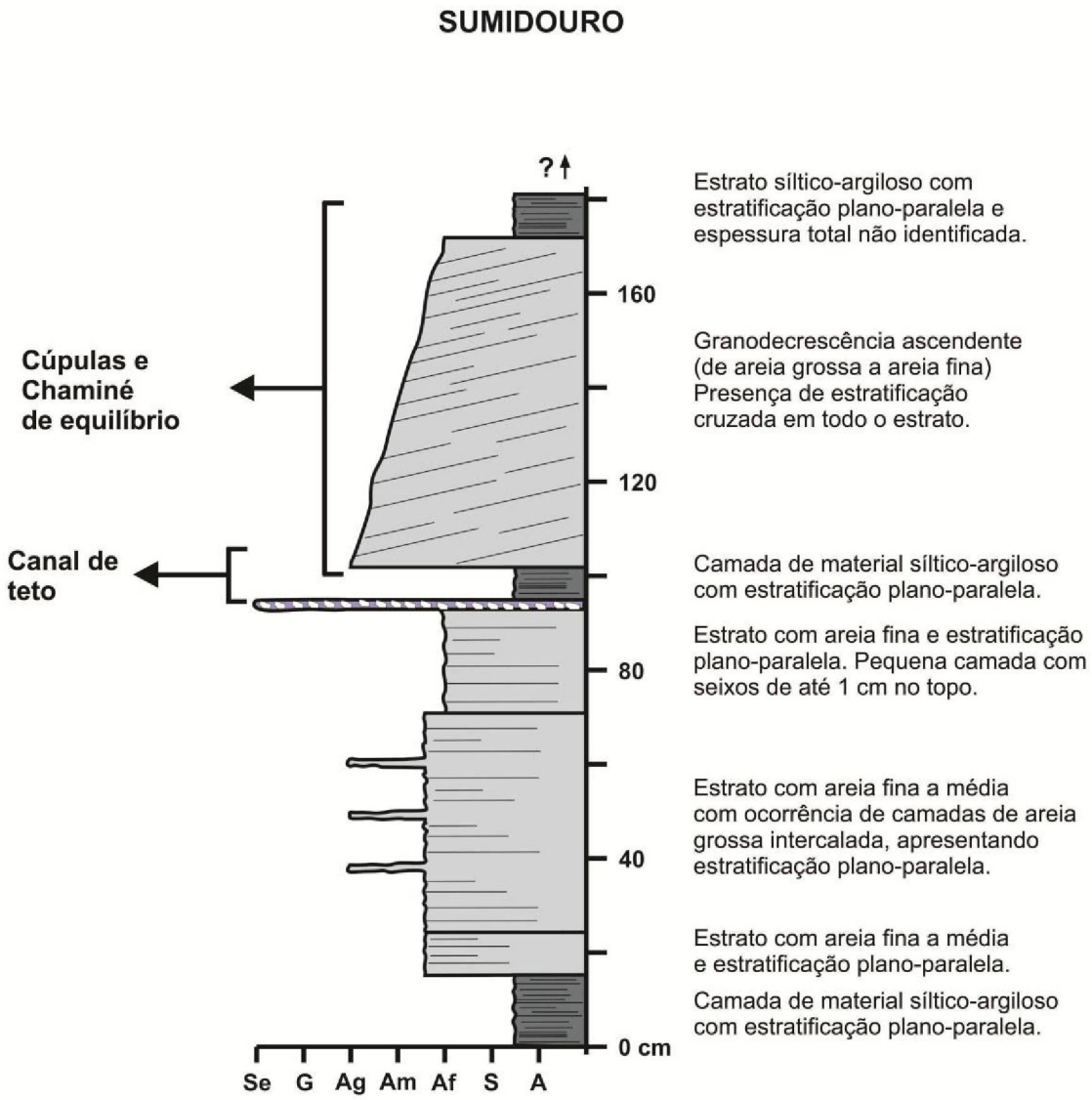

Seção geológica
Gruta Andorinhas da Pedra Suspensa
?
200
160
120
80
40
0 cm
Rocha arenizada e fantomizada
Local de amostragem
Se G Ag Am Af S A
Areia média a fina, moderadamente selecionada (subarredondada a arredondada), estratificação não obsrevada. Rochas alteradas ocorrem associadas à Intraclastos de argila.
Estrato com granodecrescência ascendentede de areia mal selecionada fina a média. Ocorrência de intraclastos de argila e pequenas porções de alterações na rocha (menor que 10 cm). Estratificação não observada.
Presença de areia média mal selecionada e grânulos esparsos, com estratificação plano-paralela. Ocorrência de rochas alteradas associadas à intraclastos de argila.
Camada com areia média a fina e grânulos esparsos. Presença de intraclastos de argila e porções de alteração da rocha.
Estrato com predomínio de areia média com estratificação plano-paralela. Ocorrência de vários intraclastos argilosos e grânulos esparsos. Areia mal selecionada com grânulos arredondados a subarredondados. Porções de alteração da rocha ocorrem com intraclastos de argila.

Seção geológica Gruta Macarrão




Seção geológica do Sumidouro da Mariquinha
RESSURGÊNCIA
?
200
160
120
80
40
0 cm
Se G Ag Am Af S A
Estrato de areia grossa com estratificação levemente cruzada.
Estrato de areia fina com estratificação levemente cruzada e presença de icnofósseis do icnogênero *Palaeophycus* sp..
Presença de areia média a grossa com estratificação plano-paralela.
Estrato de material síltico-argiloso com estratificação plano-paralela e presença de mica.
Estrato de areia fina a média com estratificação plano-paralela.

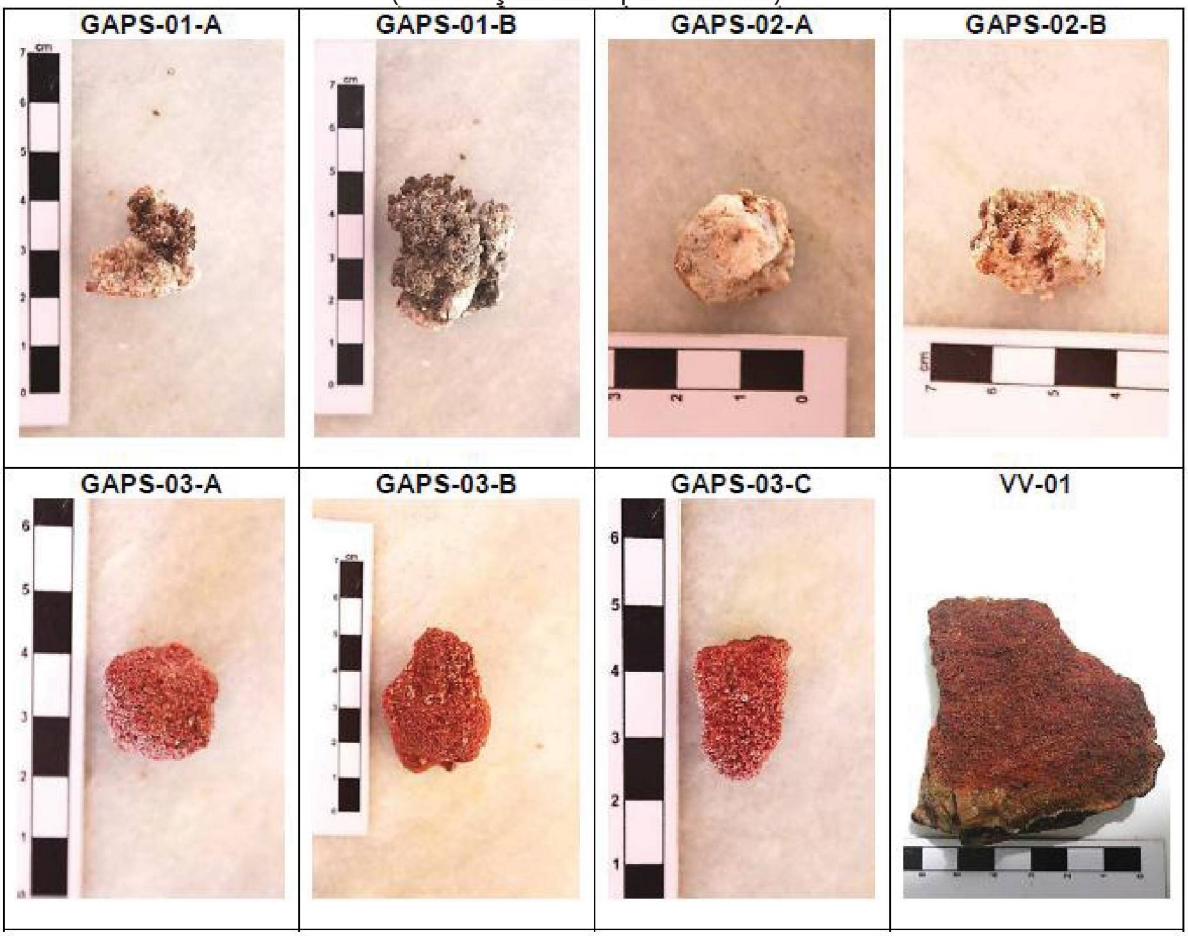
Seção geológica do Sumidouro da Mariquinha



Amostras coletadas no Arenito Vila Velha (Formação Campo Mourão).

	Código da amostra	Tipo de material coletado	Tipo de análise realizada
1	GAPS-01-A	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	MEV/EED
2	GAPS-01-B	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	Lâmina delgada, Microtomografia e DRX
3	GAPS-02-A	Espeleotema do tipo cogumelo	DRX
4	GAPS-02-B	Espeleotema do tipo cogumelo	MEV/EED e
5	GAPS-03-A	Rocha arenizada e/ou fantomizada	MEV/EED
6	GAPS-03-B	Rocha arenizada e/ou fantomizada	Lâmina delgada
7	GAPS-03-C	Rocha arenizada e/ou fantomizada	Microtomografia
8	VV-01	Arenito Vila Velha sem alteração	Lâmina delgada

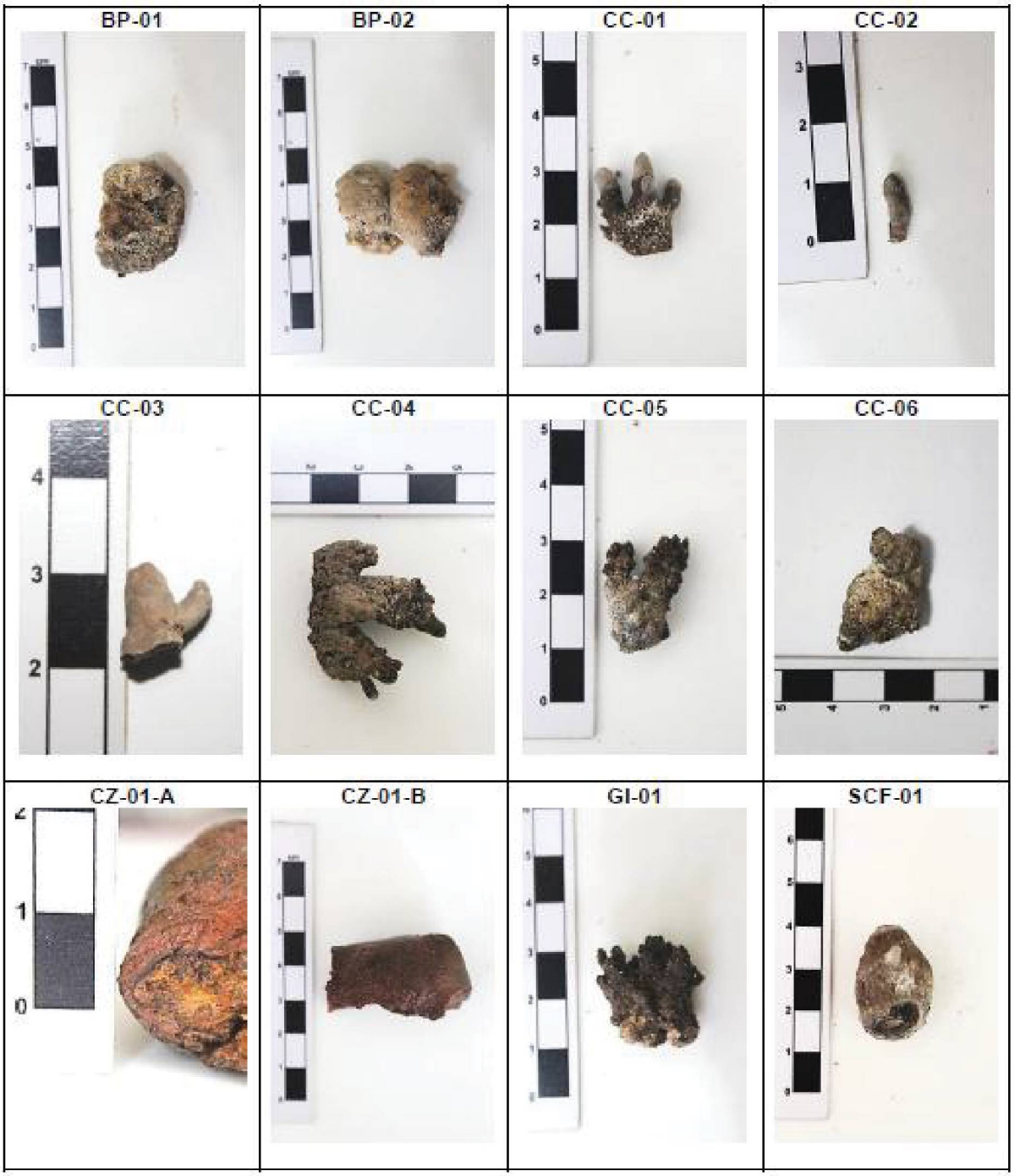
Fotos das amostras coletadas no Arenito Vila Velha (Formação Campo Mourão).

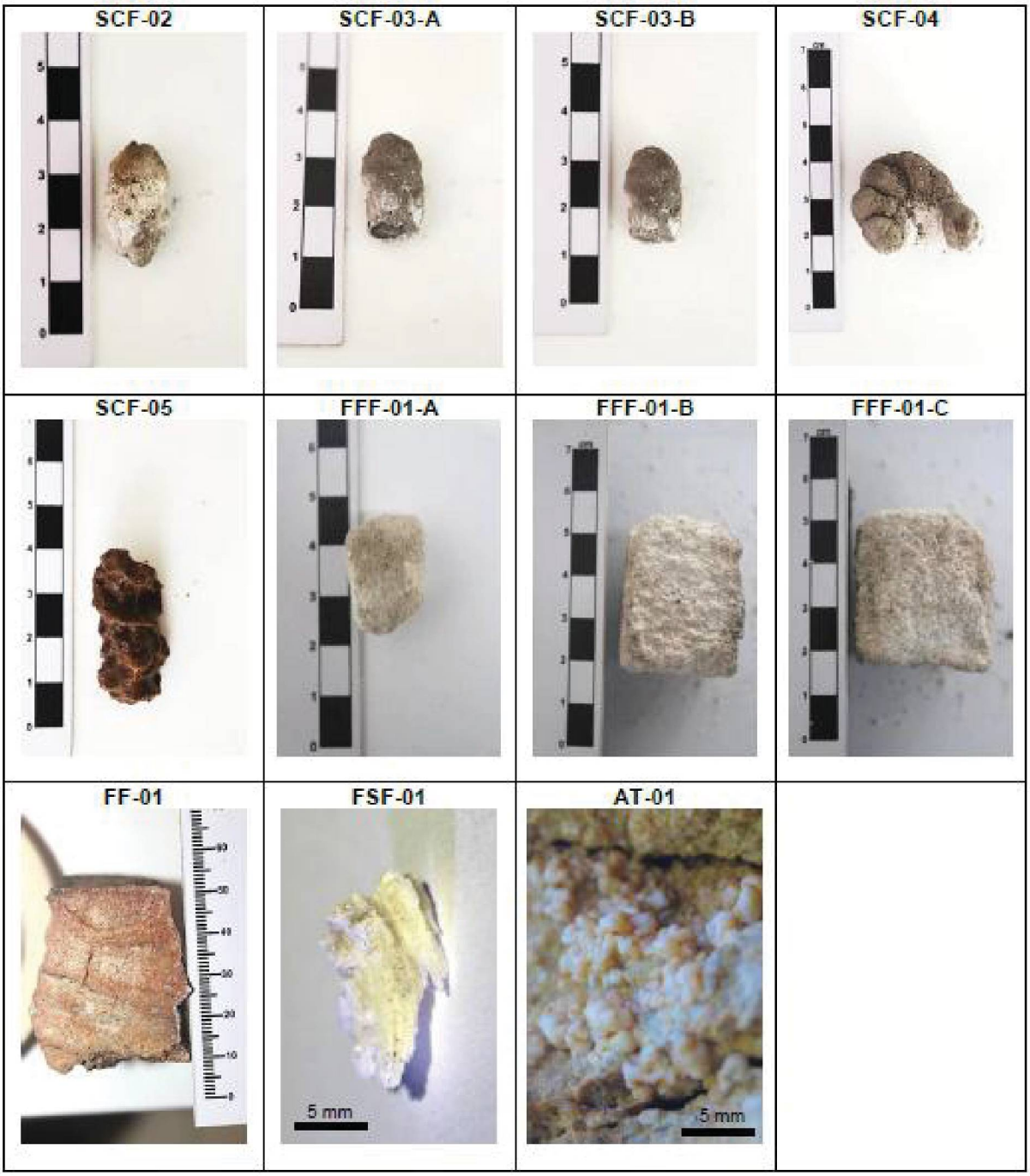


Amostras coletadas na Formação Furnas.

	Código da amostra	Tipo de material coletado	Tipo de análise realizada
1	BP-01	Espeleotema do tipo cogumelo	DRX
2	BP-02	Espeleotema do tipo cogumelo	MEV/EED
3	CC-01	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	Lâmina delgada
4	CC-02	Espeleotema do tipo estalactítico	Lâmina delgada
5	CC-03	Espeleotema do tipo estalactítico	MEV/EED
6	CC-04	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	Lâmina delgada
7	CC-05	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	Lâmina delgada
8	CC-06	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	MEV/EED
9	CZ-01-A	Espeleotema do tipo estalagmítico	Lâmina delgada
10	CZ-01-B	Espeleotema do tipo estalagmítico	MEV/EED
11	GI-01	Espeleotema do tipo arborescente (coral)	MEV/EED
12	SCF-01	Espeleotema do tipo colunar de crescimento horizontal/ascendente	DRX
13	SCF-02	Espeleotema do tipo colunar de crescimento horizontal/ascendente	Lâmina delgada
14	SCF-03-A	Espeleotema do tipo colunar de crescimento horizontal/ascendente	Microtomografia
15	SCF-03-B	Espeleotema do tipo colunar de crescimento horizontal/ ascendente	Lâmina delgada
16	SCF-04	Espeleotema do tipo cogumelo	MEV-EED
17	SCF-05	Escorrimento do tipo micro *gours*	MEV/EED
18	FFF-01-A	Rocha arenizada e/ou fantomizada	MEV/EED
19	FFF-01-B	Rocha arenizada e/ou fantomizada	Microtomografia
20	FFF-01-C	Rocha arenizada e/ou fantomizada	Lâmina delgada
21	FF-01	Arenito Furnas sem alteração	Lâmina delgada
22	FSF-01	Espeleotema do tipo fibroso	DRX
23	AT-01	Espeleotema (em análise)	DRX

Fotos das amostras coletadas na Formação Furnas.




SCF-02
SCF-03-A
SCF-03-B
SCF-04
SCF-05
FFF-01-A
FFF-01-B
FFF-01-C
FF-01
FSF-01
5 mm
AT-01
5 mm