

Nota Técnica

Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias

Cave Survey in Mining Sector: advances and new technologies

Adam Barros Fernandes¹, Ricardo Perobelli Borba², Iuri Viana Brandi³, Ramon Nunes Araújo⁴, Bruno dos Santos Scherer⁵, Tomás Romualdo Corrêa⁶ e Gabrieli Santos Boulhosa⁷

- ¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. adambarrosgeo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2686-278X>
- ² Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. borba@ige.unicamp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1162-409X>
- ³ Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. iuri.brandi@vale.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8593-6654>
- ⁴ Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. ramon.araujo@vale.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5948-8210>
- ⁵ Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. bruno.scherer@vale.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8030-1959>
- ⁶ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. tomasrcorrea@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1598-8379>
- ⁷ Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil. gabrieli.boulhosa@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-0838>

Recebido: 17/11/2022; Aceito: 20/03/2023; Publicado: 04/09/2023

Resumo: Os mapas topográficos de cavernas são base de dados fundamentais para uma série de estudos científicos, trabalhos de licenciamento ambiental e tomadas de decisão dos órgãos públicos para preservação do patrimônio espeleológico. Porém, a confecção desses mapas segue praticamente a mesma metodologia dos últimos 100 anos, utilizando três equipamentos básicos: bússola, clinômetro e trena. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica da evolução dos métodos de levantamento topográfico de cavernas aplicadas ao contexto de atividades de mineração. São comparados os tipos de instrumentos utilizados nas diferentes técnicas de mapeamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas. No que se refere aos levantamentos topográficos mais atuais, o uso do laser *scanner* 3D e da fotogrametria vem se mostrando como métodos promissores com relação a obtenção dos parâmetros espeleométricos (ex: área, volume e projeção horizontal), tendo em vista a maior agilidade para a realização do levantamento de campo, maior facilidade para interpretação das estruturas geológicas, além do ganho em segurança para a equipe em campo.

Palavras-chave: Espeleologia; Topografia; Disto X; Laser Scanner 3D; Fotogrametria.

Abstract: Cave topographic maps are essential data for a series of scientific studies, environmental licensing purposes and the preservation of speleological heritage. However, map sketching follows practically the same methodology in the last 100 years,

using three basic equipment: compass, clinometer and tape measure. This paper presents a bibliographic review of the evolution of cave survey methods in mining sector. The types of instruments of cave survey are compared. With regard to the most current topographic surveys, the use of 3D laser scanning and photogrammetry has shown that these methods are promising to improve speleometric parameters (ex: area, volume e horizontal projection), accuracy and achieve greater agility, in view of greater agility to perform field survey, greater ease for interpretation of geological structures, and finally gaining safety for people on field work.

Keywords: Speleology; Topography; Disto X; Laser Scanner 3D; Photogrammetry.

1. Introdução

A espeleologia brasileira vivenciou uma grande transformação em decorrência das mudanças ocorridas na legislação do Brasil no âmbito do licenciamento ambiental, em especial com a publicação da Resolução nº 005/1987 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que aprovou o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, instituindo a obrigatoriedade da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental nos casos de empreendimento potencialmente lesivo ao Patrimônio Espeleológico Nacional (CONAMA, 1987).

As cavernas no Brasil são estabelecidas como bens da União, conforme disposto pelo art.20 da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). Além disso, de acordo com o Decreto nº 6.640/2008, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, temos que: “*As cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional deverão ser protegidas, de modo a permitir a realização de estudos e de pesquisas de ordem técnico-científica, bem como atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo.*” (BRASIL, 2008). Dessa forma, pode-se perceber a relevância do patrimônio espeleológico para todo povo brasileiro.

As empresas de mineração ao realizarem o mapeamento das cavernas existentes na área diretamente afetada (ADA) e indiretamente afetada (AIA) pelo empreendimento acrescentam a elas um raio de influência de 250 metros para preservação e incluem em seu inventário todas aquelas cavidades cujo raio de 250 metros intercepta essa área, independentemente do seu grau de relevância (SALUM, 2013).

De acordo com o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), no Brasil, existem por volta de 21.500 cavidades naturais subterrâneas cadastradas no banco de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (Canie) (ICMBio, 2021). Porém, conforme proposto por Auler e Zogbi (2005), há uma expectativa de que o Brasil possua mais de 100.000 cavidades. Dessa forma, com o intuito de conhecer, pesquisar e preservar o patrimônio espeleológico, é primordial a realização do mapeamento topográfico das cavernas.

O mapa espeleológico é essencial por uma série de motivos, tais como: definição da morfologia da cavidade em relação ao relevo externo, orientação espacial e dimensão dos condutos, identificação de instabilidades geotécnicas (ex: abatimento de blocos), existência de surgências, presença de estruturas geológicas e espeleotemas. Além disso, o mapa é evidência de que a exploração foi de fato realizada, também indicando novas possibilidades de continuidade dos condutos.

Por intermédio do resultado do mapeamento é possível obter os parâmetros espeleométricos da caverna (posicionamento geográfico da(s) entrada(s), área, volume, projeção horizontal, desenvolvimento linear e desnível). Por fim, o mapa serve de base para outros trabalhos a serem desenvolvidos dentro das cavernas nas áreas da geologia, biologia, paleontologia, paleoclimatologia, arqueologia, história, turismo etc. (RUBBIOLI et al., 2019). Com a inclusão da espeleologia no âmbito dos processos de licenciamento ambiental, o mapeamento topográfico tornou-se ponto fundamental para reconhecer, documentar e preservar cavernas nas áreas diretamente e indiretamente afetadas por empreendimentos de mineração, obras civis e produção de energia elétrica.

Conforme disposto por Rubbioli et al. (2019), com relação aos levantamentos topográficos, tem-se que: “*os levantamentos consistem em estabelecer uma série de pontos dentro da caverna (bases ou estações), interligados por visadas, de forma que seja possível saber a posição relativa de cada um em relação a um referencial predeterminado (uma entrada, por exemplo) e em relação aos limites da cavidade (paredes, piso e teto). Esses pontos são chamados de bases topográficas.*” Dessa forma, pode-se perceber que conceitualmente o mapeamento de cavernas não mudou ao longo do tempo, mas sim os equipamentos e ferramentas utilizadas para levantamento e produção dos mapas (Figura 1).

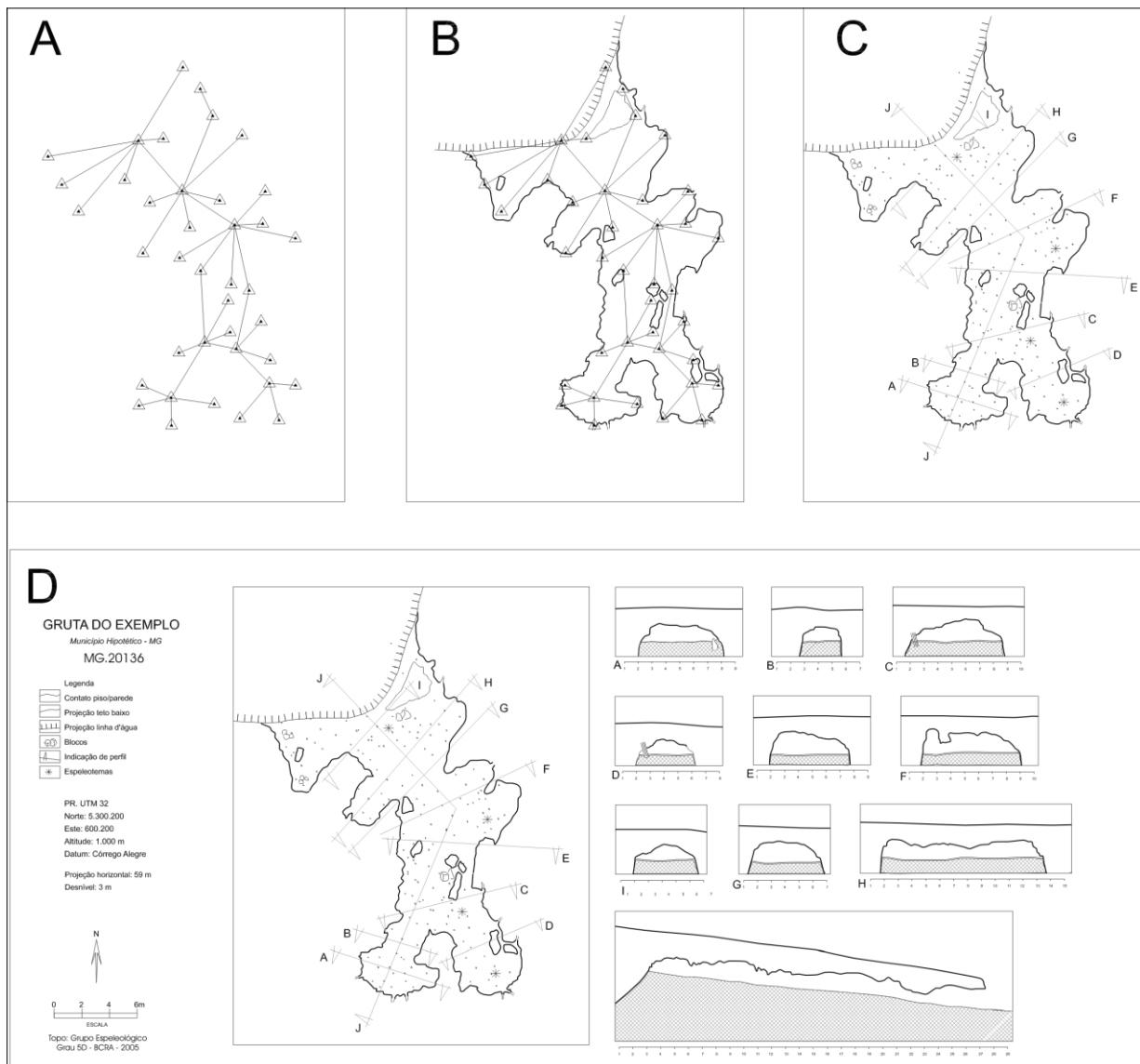


Figura 1. Evolução do processo de confecção da planta baixa de uma caverna hipotética. Representação das visadas (linhas) e bases topográficas (triângulos), também chamada de linha de trena (A); Fechamento da poligonal com o traçado do contorno das paredes da caverna (B); Plotagem dos detalhes específicos de cada caverna, como blocos abatidos, textura do piso, espeleotemas, cursos d'água etc. Além da identificação dos cortes transversais e perfil longitudinal (C); Mapa topográfico final contendo todas as informações supracitadas (D). Fonte: ICMBio, (2011).

Vale destacar também que grande parte da literatura sobre a espeleologia demonstra o papel fundamental dos mapas topográficos para embasamento de outros estudos interdisciplinares para fim de registro inicial, pesquisas científicas ou licenciamento ambiental (RUBBIOLI; MOURA, 2005; LOTT, 2013). Porém, como existem escassos trabalhos científicos que discutem especificamente sobre o tema de levantamento topográfico em cavernas no setor mineral, este artigo pretende ser uma contribuição relevante do ponto de vista conceitual quanto a evolução das técnicas para mapeamento de cavernas ao longo do tempo.

2. Materiais e Métodos

Este artigo contempla uma revisão de literatura sobre o histórico e estado da arte a respeito do mapeamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas em áreas de mineração, tendo em vista as escassas publicações sobre essa temática. Dessa forma, buscou-se informações referentes a evolução das metodologias, técnicas, equipamentos e *software* utilizados para tratamento dos dados dos levantamentos topográficos em cavernas ao longo do tempo.

3. Contexto Histórico

No âmbito do levantamento e registro topográfico de cavernas, o ato de mapear passou de uma forma rudimentar de documentação para uma ferramenta essencial na definição do grau de relevância e respectiva conservação das cavidades (RUBBIOLI et al., 2019).

Durante o século 16, viajantes, tais como estudiosos, comerciantes, artistas e nobres visitavam as regiões cársticas da Europa. Eles ansiavam por novas descobertas, inspiração romântica ou até mesmo algum tipo de distração prazerosa, que poderia ser satisfeita explorando cavernas. Os motivos desses viajantes, no entanto, eram diversos. Por exemplo, alguns adentravam nas cavernas para expandir seus conhecimentos e prosseguir com pesquisas, enquanto outros tinham o objetivo de ampliar suas coleções de objetos naturais como plantas raras, insetos, fósseis e minerais (SHAW, 2008).

A necessidade de realizar o mapeamento de cavernas é reconhecida há séculos. O mapa mais antigo com precisão razoável, que se tem notícia, é datado de 1748 da caverna *Postojnska jama* situada na Eslovênia (NAGEL, 1748) (Figura 2). A evolução gradual na qualidade e precisão dos mapas das cavernas pode ser rastreado seguindo a sequência histórica de mapas da *Mammoth Cave* nos Estados Unidos (SUTTON, 2017) (Figura 3). Sendo que o primeiro mapa da *Mammoth Cave* é um esboço com pouco detalhamento da caverna publicado em 1811, já a última atualização do mapeamento dessa caverna (ainda incompleto) exhibe um desenvolvimento linear de aproximadamente 663 km (SUTTON, 2017).

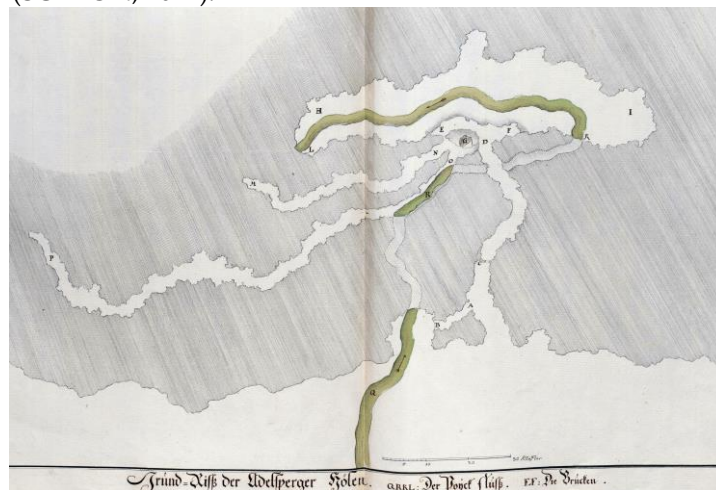


Figura 2. Mapa topográfico da caverna *Postojnska jama* situada na Eslovênia, elaborado por Joseph Anton Nagel. Fonte: Nagel, (1748).

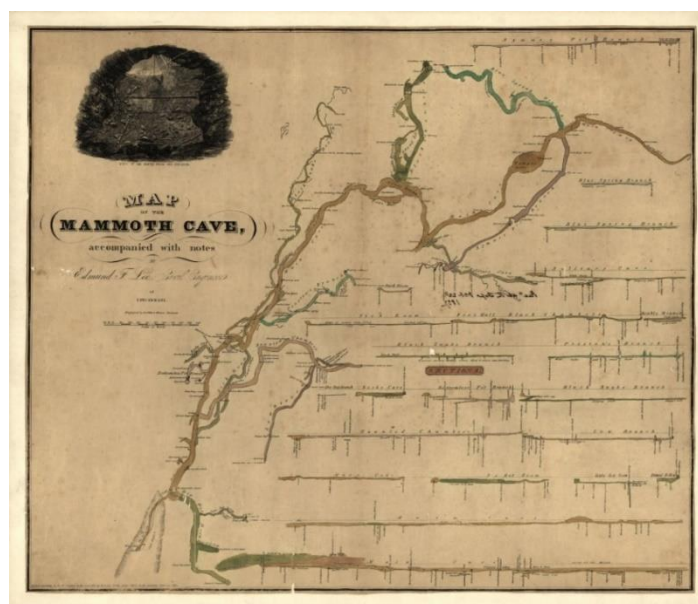


Figura 3. Mapa topográfico da caverna *Mammoth Cave* situada no Kentucky, Estados Unidos. Fonte: Lee, (1835).

Historicamente, o trabalho de campo voltado para pesquisas sobre espeleologia se iniciou em meados do século 18, quando práticas empíricas utilizando conceitos básicos das ciências da terra eram aplicados em estudos de campo (WYSE JACKSON, 2007). Antes desse período as hipóteses sobre a espeleogênese eram formuladas sem observações diretas de campo. Porém, a partir do século 18 estudos espeleológicos se tornaram impensáveis sem a coleta de dados em campo. Desde então, a prática de campo foi um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento da espeleologia como uma área de estudo específico da ciência (VACCARI, 2007; KLEMUN, 2012). No final do século 19, com o avanço dos métodos topográficos, baseados anteriormente nas técnicas aplicadas para as operações de mineração na Eslovênia, os espeleólogos começaram a estabelecer seus próprios métodos para levantamento de cavernas (ARNBERGER, 1966).

No início para a medição indireta das distâncias dentro de uma caverna era calculado o tempo em horas, ou seja, o tempo necessário para atravessar os condutos da caverna. Já com relação aos primeiros estudos espeleológicos do século 19, eles começaram a calcular distâncias nas cavernas utilizando unidades de comprimento. Como exemplo, pode ser citada a exploração de Adolf Schmidl de mais de 15 quilômetros em cavernas eslovenas, cujas pesquisas foram publicadas no anuário do Serviço Geológico Austríaco (SCHMIDL, 1850; SHAW, 1978). Este pesquisador também criticou a prática de considerar o tempo necessário para cobrir uma distância como o comprimento equivalente da caverna (SCHMIDL, 1854).

Em meados do século 19, o número de viajantes interessados em cavernas aumentou devido as melhorias na infraestrutura de transporte, o que facilitou viajar para regiões cársticas remotas. As fontes de informação, além de conselhos de companheiros de viagem, variavam de livros dos primeiros viajantes que descreviam maravilhas e manuais detalhados de algumas cavernas. Na década de 1820, os primeiros guias ilustrados foram difundidos, descrevendo as cavernas mais conhecidas da Croácia e Eslovênia. Esses guias foram publicados por pesquisadores como Girolamo Agapito (1823), Franz Hohenwart (1830-32), e Adolf Schmidl (1853) em várias línguas como italiano, alemão, francês e esloveno (MATTES, 2015). Por outro lado, nos Estados Unidos, a principal causa para o levantamento inicial das cavernas no início do século 19 foi a exploração de jazidas de salitre (WOOKEY, 2004).

Especialmente na Eslovênia, o mapeamento e nomeação de cavernas foi um ato político que representava o domínio social nas regiões do país de língua alemã ou italiana. Com o avanço do nacionalismo e contextos imperialistas no início do século 20 na Europa, este processo foi extremamente significativo. O espeleólogo austríaco Hans Reisner descreveu a cartografia de cavernas como um método para tomar posse de uma área subterrânea, com o objetivo de explorar os recursos subterrâneos de forma comercial e/ou científica (REISNER, 1921). Por fim, a adoção de métodos cartográficos e geodésicos para mapeamento de cavernas pode ser considerada como elemento fundamental para o estabelecimento da espeleologia como um campo independente da ciência (KYRLE, 1923).

É importante destacar que no campo da espeleologia, a primeira metade do século 20 é marcada pela busca por instrumentos adequados especificamente para o levantamento topográfico de cavernas e não a utilização dos mesmos equipamentos já aplicados em minerações subterrâneas nos países europeus (LÜDEMANN, 1927). Em decorrência das suas dimensões, peso e dificuldade para serem transportados, os instrumentos utilizados pelas mineradoras não foram considerados adequados para o uso em cavernas. Dessa forma, após a Primeira Guerra Mundial, foram desenvolvidos e testados novos instrumentos, que foram eventualmente, modificados para a realidade das cavidades naturais. A partir disso, vários trabalhos foram publicados em revistas de espeleologia com o intuito de apresentar novas técnicas e instrumentos para o mapeamento de diversos tipos de cavernas (grutas, abismos, cavernas submersas, formadas pelo gelo etc.) (OEDL, 1923). Vale destacar também que cada clube ou sociedade espeleológica de meados do século 20 criou/padronizou um método específico de mapeamento e definiu a utilização de instrumentos para o levantamento topográfico, que basicamente era composto pelos seguintes equipamentos: bússola, nível, clinômetro e trena.

Com relação a espeleologia brasileira, a primeira descrição e levantamento de parâmetros espeleométricos que se tem registro no país foi realizado na Gruta da Onça, próxima a Vila Bela da Santíssima Trindade/MT no século 18. Esse mapeamento foi realizado pelo Alferes José Joaquim Leite de Campos, porém, o registro ficou restrito à informação escrita, não possuindo evidência de croqui ou mapa (AULER; RUBBIOLI; BRANDI, 2001).

Em meados do século 19, uma série de naturalistas estrangeiros também se interessaram pelo estudo de cavernas no Brasil. Esses cientistas se tornaram essenciais para o início do mapeamento e catalogação de cavidades. Dentre eles, destaca-se o dinamarquês Peter Wilhelm Lund e o norueguês Peter Andreas Brandt, que começaram os primeiros mapeamentos espeleológicos regulares do Brasil. Lund desenvolveu suas pesquisas no período de

1835 a 1844, gerando uma série de descobertas científicas, dentre elas mais de 100 cavidades naturais subterrâneas no estado de Minas Gerais, a descoberta de ossadas de animais e até mesmo ossos humanos, denominado popularmente como “homem de Lagoa Santa”. Além disso, Brandt era responsável pelas ilustrações e mapas que compunham a obra do naturalista Peter Lund (FIGUEIREDO, 2011).

Ao longo do século 20, com a criação dos grupos de espeleologia no Brasil ocorreu um grande avanço na realização de mapeamentos topográficos das cavernas brasileiras. Em 1950, Richard Krone produziu o primeiro cadastro espeleológico brasileiro, catalogando 41 cavernas do Vale do Ribeira - SP, contendo mapas e fotografias dessas cavidades. Dessa forma, com o desenvolvimento da espeleologia brasileira, tornou-se necessária a criação de um grupo de espeleologia no país. Assim, em 1937 foi fundada a Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), da Escola de Minas de Ouro Preto. Em 1960 foi criada a seção de espeleologia do Clube Alpino Paulista, com o intuito de desenvolver os estudos espeleológicos no estado de São Paulo. Além disso, com o objetivo de incentivar a criação de novos grupos de espeleologia no Brasil, foi fundada em 1969 a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) (LINO, 1989; AULER, 1997).

Nos dias atuais novas tecnologias de mapeamento estão sendo cada vez mais utilizadas para a realização do mapeamento topográfico de cavernas, em especial as voltadas para o mapeamento em três dimensões (3D) das cavidades, com o intuito de levantar parâmetros espeleométricos e visualização em 3D, diferente da topografia tradicional que apresenta produtos em duas dimensões. Os resultados dos mapeamentos atuais além de gerarem mapas também produzem modelos em 3D com base na obtenção de nuvem de pontos por meio do levantamento de campo. Porém, consomem muito mais tempo de trabalho em escritório com o processamento e análise dos dados. Entretanto, os mapeamentos atuais geram um ganho de tempo no levantamento topográfico em campo e são capazes de gerar arquivos digitais que podem ser revisitados várias vezes.

4. Levantamento Espeleotopográfico Convencional

Em decorrência das suas características peculiares, para se mapear uma caverna com um grau de precisão satisfatório necessita-se de técnicas específicas para a realização do levantamento topográfico. Embora possam ser aplicados equipamentos topográficos tradicionais utilizados em superfície (como teodolito e estação total) nas cavernas com grandes salões, na maior parte das cavidades, que possuem pequenas dimensões, instrumentos leves, compactos e de baixo custo são essenciais.

Nos dias atuais, para a realização do levantamento topográfico convencional de uma caverna são utilizados os seguintes instrumentos básicos: bússola, clinômetro, trena e GPS de navegação (*Global Positioning System*) (MAGALHÃES; LINHARES, 1997).

Utilizando esses equipamentos básicos da topografia convencional, consegue-se garantir uma relação custo/desempenho razoável, bem como uma boa operacionalidade dos instrumentos. Com o intuito de pesquisar condutos principais com maior precisão, os espeleólogos também utilizam, em alguns casos, teodolito e estação total. Teodolitos e sistemas de GPS são frequentemente usados para levantamento de superfície de formações cársticas e entradas de cavernas (HELLER; NEUMANN, 2001).

É importante ressaltar também uma vantagem relevante do levantamento convencional em comparação aos métodos modernos que é a simplicidade, ou seja, o mapa em 2D é mais intuitivo e fácil para posicionamento e localização em campo do que os modelos muitas vezes mais complexos obtidos em 3D.

Um ponto importante sobre a técnica de levantamento topográfico convencional é que atualmente existem métodos disponíveis com maior precisão nas medições, pois esse método convencional depende da interpretação direta e experiência do espeleólogo em campo sobre as feições cársticas identificadas visualmente. Dessa forma, é um grande desafio representar um ambiente tridimensional de forma bidimensional (mapa topográfico), sendo necessário inferir alguns pontos. Além disso, por conta da iluminação insuficiente e da constante utilização da interpretação visual os erros associados se tornam mais comuns.

Vale destacar que o produto do levantamento topográfico convencional é um mapa topográfico bidimensional da cavidade mapeada (Figura 4), contendo: a planta baixa, seções transversais, seção longitudinal, localização geográfica da entrada da caverna, parâmetros espeleométricos (área, volume, projeção horizontal, desnível, grau de precisão etc.), características geológicas, biológicas, arqueológicas etc.

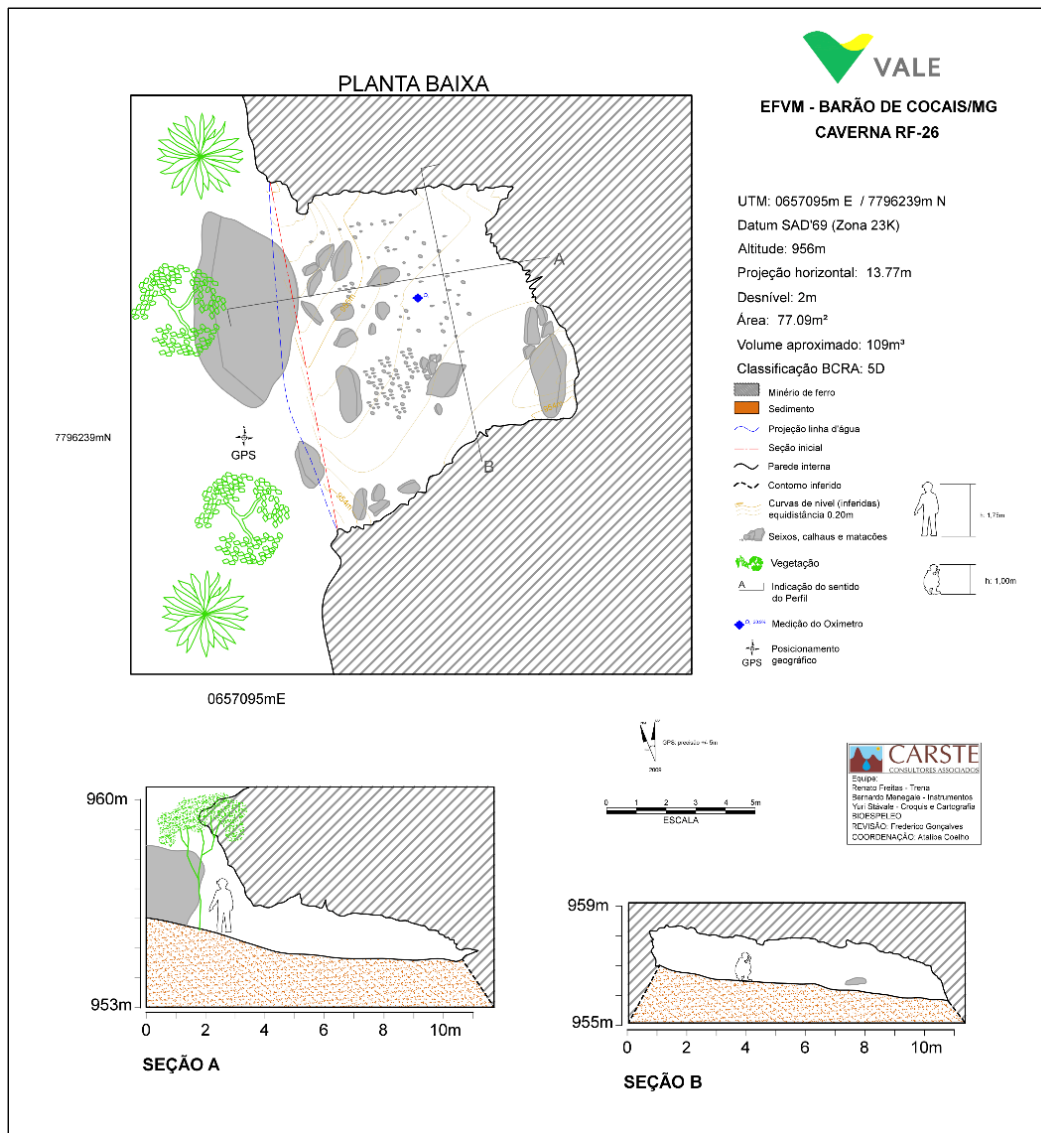


Figura 4. Mapa topográfico produzido utilizando o levantamento topográfico convencional da caverna RF-26 - Projeto EFVM - Barão de Cocais/MG. Fonte: Vale S.A., (2009).

5. Levantamento Espeleotopográfico Moderno

Neste artigo, o levantamento topográfico moderno é caracterizado como aquele que utiliza equipamentos distintos dos convencionais (bússola, clinômetro, trena e GPS). Dessa forma, com a evolução tecnológica dos equipamentos utilizados no mapeamento topográfico de cavernas, além do levantamento topográfico tradicional, são utilizados novos métodos: trena digital a laser, escaneamento a laser 3D e fotogrametria, que são descritos a seguir.

5.1. Trena digital a laser

A trena digital a laser atualmente é um equipamento que funciona baseado na emissão de um impulso eletromagnético em forma de raio laser por meio de um sistema ótico-eletrônico. O feixe de luz desse equipamento reflete no plano a ser medido e retorna ao instrumento de medição. Consequentemente, a trena a laser processa o feixe de luz refletido e determina a distância medida entre o equipamento e a superfície de interesse (TME, 2019). A trena a laser foi modificada por espeleólogos com uma placa de circuito adicional que permite a medição de ângulos horizontais e verticais (ex: equipamento Leica DistoX). Dessa forma esse instrumento consegue substituir de forma integral o conjunto bússola, clinômetro e trena, sendo possível medir o azimute, a inclinação e a distância das visadas.

Vale destacar que esse equipamento possui uma série de vantagens quando comparado com o método de levantamento topográfico tradicional: (1) Permite fazer a leitura diretamente no ponto da base topográfica (a bússola e o clinômetro normalmente devem ser afastados para permitir a visão do mostrador); (2) leituras realizadas com uma casa decimal para azimute e inclinação, além de duas casas decimais para as distâncias; e (3) transmissão dos dados via Bluetooth para outros dispositivos móveis (smartphones e tablets), evitando erros de anotação e diminuindo o tempo no tratamento dos dados no trabalho pós-campo. Outro ponto relevante é que o sistema permite ainda que o desenho possa ser feito na própria caverna com auxílio de um dispositivo móvel. À medida que a topografia progride e as leituras são realizadas, a posição das bases aparece na tela do smartphone e/ou tablet, facilitando e melhorando a qualidade do croqui (esboço inicial do interior da caverna) (Figura 5).

Com relação as desvantagens, a calibração da trena digital a laser é complexa e esse equipamento possui elevada sensibilidade a interferências magnéticas, sejam elas provenientes de minerais/rochas (ex: formações ferríferas) ou de equipamentos metálicos usados pelo espeleólogo.

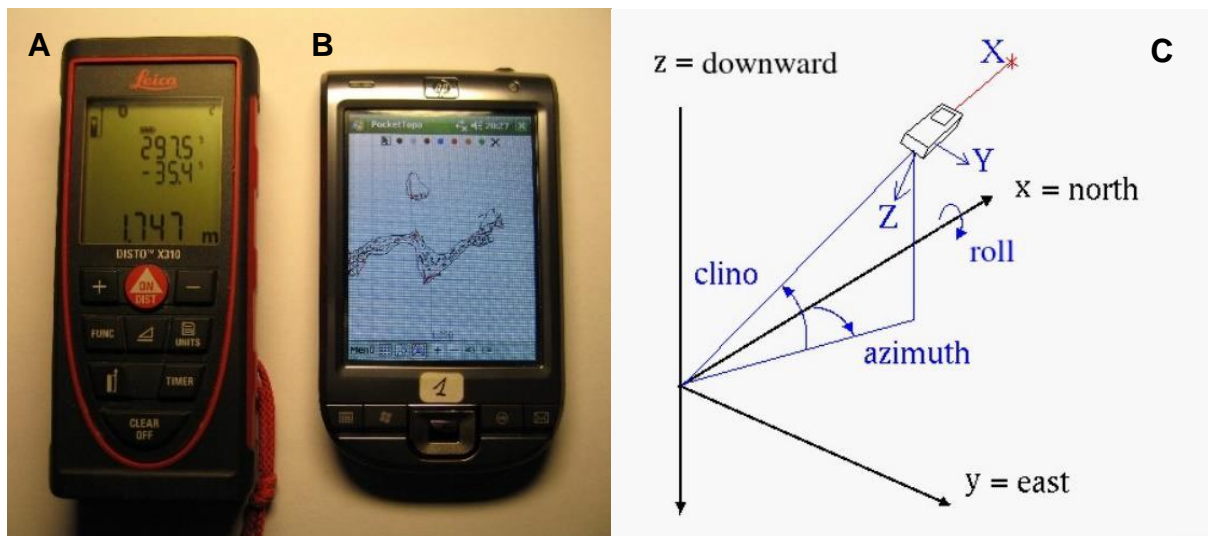


Figura 5. Trena digital a laser modelo Leica DistoX310 (A); Dispositivo móvel para recebimento, consolidação e edição dos dados obtidos com a trena a laser (B); Funcionamento geral do Leica DistoX, medindo em apenas um equipamento simultaneamente o azimute (*azimuth*), inclinação (*clino*) e distância do equipamento até um ponto "X" (C). Fonte: Hebb, (2010); Corvi, (2020).

5.2. Escaneamento a laser 3D

O levantamento via laser *scanner* 3D em cavernas é uma tecnologia relativamente recente, que fornece resultados inéditos de aquisição permitindo a obtenção de produtos mais precisos, detalhados e apropriados para utilização em *software* e ambientes multidisciplinares (ARAÚJO, 2016).

O escaneamento a laser 3D é feito com um equipamento que utiliza como base espelhos giratórios com o intuito de gerar os pulsos de laser que conseguem combinar dados de distância e de ângulos horizontais e verticais para produzir coordenadas em três dimensões (BUCKLEY et al., 2008). Cada varredura desse equipamento gera uma nuvem de pontos (com dezenas a centenas de milhares de pontos por segundo) com abrangência de 360° horizontal e 270° vertical e com alcance efetivo por volta de 50 a 60 metros, dependendo das condições da topografia local de cada caverna (GROHMANN et al., 2019). O *scanner* a laser é um instrumento de linha de visão, que é utilizado atualmente em dois modelos principais: o modelo estático necessita de marcação de bases com visadas entre elas, como no método convencional; com o modelo portátil é necessário marcar uma referência externa à cavidade, sendo realizado o mapeamento sem necessidade de marcação de bases para assegurar a cobertura completa da caverna (LERMA; BIOSCA, 2008).

Atualmente, existem equipamentos capazes de produzir imagens tridimensionais das cavernas com alta precisão e ótima qualidade gráfica (Figura 6). O mapeamento produz um modelo digital de alta precisão a partir de uma série de pontos georreferenciados distribuídos de forma tridimensional, comumente chamado de 'nuvem 3D'. A precisão é da ordem de milímetros e o detalhamento é capaz de representar até mesmo as texturas da rocha, feições morfológicas e estratigráficas. Além disso, o produto é apresentado em um modelo tridimensional,

permitindo uma visualização virtual da distribuição e do formato das galerias. Infelizmente esses equipamentos ainda são muito caros, frágeis e não podem ser aplicados de forma indiscriminada em qualquer cavidade. Mas, no caso de cavidades onde se deseja obter um registro definitivo, essa tecnologia é o que existe de mais moderno.

Os mapeamentos topográficos com a utilização do laser *scanner* são aplicados para coletar informações mais detalhadas do que um levantamento convencional, além de serem capazes de produzir uma visualização da caverna em um modelo 3D (ZLOT; BOSSE, 2014).

A aplicação do escaneamento 3D para o levantamento topográfico de cavidades apresenta algumas vantagens quando comparado com o método tradicional, são elas: maior precisão das medidas e dos cálculos de área e volume, além de seções de grande exatidão; a utilização dessa técnica poderá ser válida em trabalhos de “salvamento” espeleológico, por meio da aplicação de um equipamento compacto e de fácil transporte; o mapeamento com o *scanner* 3D facilita a interpretação de estruturas geológicas, por conseguir obter dados em locais de difícil acesso para pessoas e permitir o tratamento dos dados em ambiente de realidade virtual (RV). Com isso, há um aumento da produtividade, redução das equipes e diminuição da exposição aos riscos em campo (GALDEANO et al., 2016).

Com relação as desvantagens, o laser *scanner* 3D é mais adequado para mapeamento topográfico de cavernas de grandes dimensões, com grandes salões e condutos de fácil acesso, tendo em vista que para a aplicação dessa tecnologia é necessário que os condutos entre galerias tenham no mínimo 50 cm x 50 cm para a instalação do equipamento (ARAÚJO et al., 2015). Dessa forma, ainda é muito difícil topografar cavernas mais complexas, como grandes abismos e cavernas com presença de água. Porém, novas versões de *scanner* 3D são portáteis eliminando grande parte dessas limitações. Um outro ponto de desvantagem é que se torna necessária a iluminação artificial para os levantamentos fotográficos realizados por determinados modelos de *scanners* em cavernas com ausência total ou parcial de luz, mas isso pode ser contornado com fontes de luz portátil de alta intensidade (ARAÚJO, 2016).

Vale destacar também que do ponto de vista técnico, o aspecto restritivo é o de que em anteparos translúcidos (água) a informação se perde, já que não é refletida. Por outro lado, no mapeamento convencional, a depender da cavidade, o mapa mostra o nível da água de forma clara e de fácil interpretação. Outra questão importante é a complexidade do processamento de uma nuvem de pontos tão densa como a gerada pelo laser *scanner*. Isso ocorre, pois atualmente existem vários modelos de *software* para tratamento dos dados com variações nas precisões obtidas e diferentes graus de experiência dos usuários, que podem influenciar no resultado/confiabilidade do processamento (GALLAY et al., 2015).

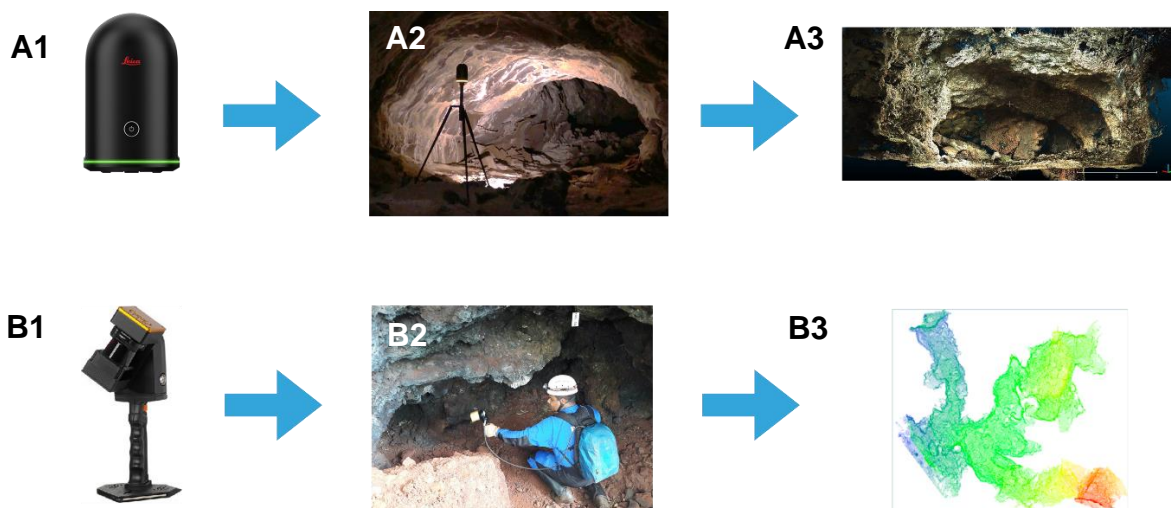


Figura 6. Mapeamento topográfico de cavidades utilizando laser *scanner*. Equipamento laser *scanner* estático modelo Leica BLK360 com captura de imagens (A1); Instalação do equipamento com captura de imagens no interior de uma cavidade (A2); Nuvem de pontos gerada pelo laser *scanner* estático com captura de imagens (A3); Equipamento laser *scanner* portátil modelo Geoslam ZEB REVO (B1); Utilização do modelo portátil no interior de uma cavidade (B2); Nuvem de pontos gerada pelo laser *scanner* portátil (B3). Fonte: adaptado de Vale S.A., (2021).

5.3. Fotogrametria

A fotogrametria é definida como a técnica que consegue reconstruir o espaço tridimensional com base em imagens bidimensionais (SIMÕES, 2019). Por meio da aplicação da fotogrametria é possível a produção de modelos 3D com base em uma nuvem de pontos extraída de fotografias que devem se sobrepor em pelo menos 60% (MATTHEWS, 2008). Vale destacar que as fotografias podem ser geradas com o auxílio de câmeras profissionais ou com simples câmeras de celular e depois processadas em *software* específicos com o intuito de alinhar as imagens e produzir o modelo tridimensional (SILVA et al., 2020) (Figura 7). A fotogrametria de curto alcance (ou *close range photogrammetry* - CRP) é definida por operações fotogramétricas que são realizadas a menos de um metro até 300 metros do alvo de interesse, sendo essa metodologia a mais utilizada para o levantamento topográfico de cavidades por meio da marcação de bases topográficas utilizadas como pontos de controle para o mapeamento (MATTHEWS, 2008).

Os levantamentos fotogramétricos de cavidades são normalmente realizados com câmeras fotográficas digitais de alta resolução com auxílio de painéis de iluminação LED. As fotografias são capazes de registrar paredes, condutos, pilares, pendentes, espeleotemas, tetos, pisos e entrada das cavernas em variados ângulos e direções com o intuito de abranger a maior parte do interior da caverna. Para construção dos modelos fotogramétricos utilizando as fotografias levantadas é necessário utilizar *software* para processamento fotogramétrico de imagens digitais e geração de dados espaciais em 3D, conforme os seguintes passos: alinhamento das fotografias; inclusão das coordenadas nos pontos de controle das fotos; inserção de máscaras; otimização do alinhamento; geração da nuvem de pontos; geração de malhas e texturas; construção do modelo 3D; exportação dos produtos gerados (SIMÕES; VEIGA; SCHMIDT, 2022).

A densidade, a nitidez e a resolução de um conjunto de imagens determinarão a qualidade da nuvem de pontos resultante, pois quanto mais curta é a distância entre a câmera e a superfície do objeto de interesse, maior será a resolução espacial da imagem, a densidade e a resolução da nuvem de pontos (VILLASENÍN; DOCAMPO; SANZ, 2017; WESTOBY et al., 2012).

As principais vantagens do método de levantamento fotogramétrico são: (1) garantir maior precisão em relação ao método convencional quanto aos produtos gerados e permitir que estas feições sejam visitadas virtualmente através dos modelos tridimensionais; (2) baixos custos para aquisição de equipamentos; (3) tempo relativamente baixo empregado para realizar os levantamentos fotográficos; (4) o levantamento fotogramétrico não apresenta susceptibilidade magnética, sendo adequado para aplicação em cavidades situadas em formações ferríferas; (5) equipamentos utilizados possuem melhor resolução para cores, normalmente são à prova d'água e facilmente transportados através de passagens estreitas das cavernas (SIMÕES, 2019).

As desvantagens do método incluem: a necessidade de iluminação artificial suficiente para o levantamento ao longo dos condutos das cavidades; conhecimento adequado para processar a nuvem de pontos em modelos 3D usando *software* fotogramétrico, pois é complexo e necessita de recursos avançados da computação, assim como o levantamento via laser *scanner* 3D (PUKANSKÁ et al., 2020).

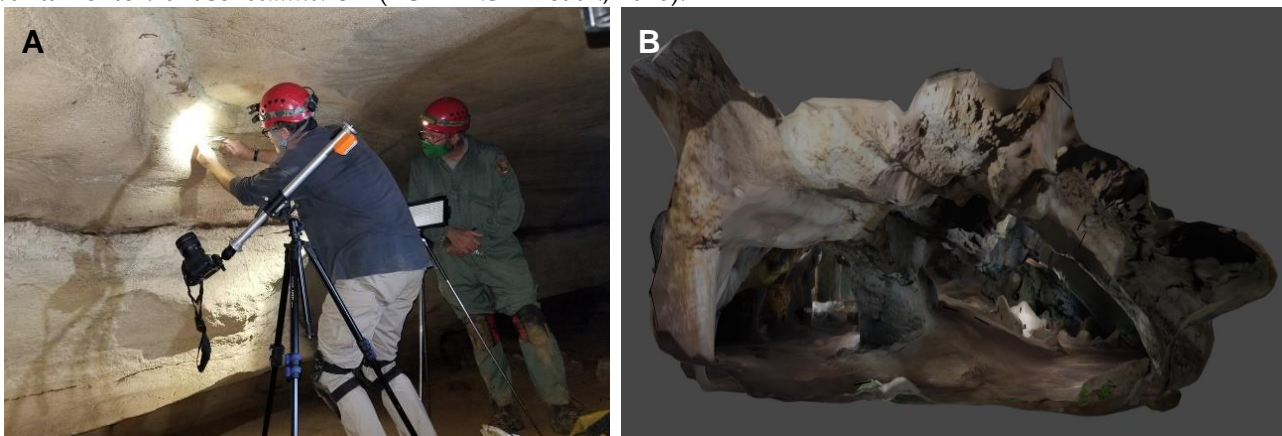


Figura 7. Levantamento fotogramétrico de cavidade natural subterrânea (A). Modelo 3D após processamento fotogramétrico da nuvem de pontos (B). Fonte: Wood e Toomey, (2020); Pukanská et al., (2020).

6. Comparação entre os Métodos

Com a evolução tecnológica nos levantamentos topográficos de cavernas ao longo do tempo, foi possível obter os parâmetros espeleométricos de forma mais precisa, com menor custo e de forma mais veloz. No Quadro 1 é feita a comparação entre os métodos de levantamento topográfico de caverna mais modernos e o convencional. São também propostos os contextos mais adequados para a aplicação das respectivas técnicas modernas.

Quadro 1. Comparação entre as técnicas modernas e convencional aplicadas ao levantamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas, bem como proposição de contexto mais adequado para aplicação da respectiva técnica moderna.

Técnica moderna de levantamento espeleotopográfico	Comparação com a técnica convencional	Contexto espeleológico mais adequado para aplicação da técnica
Trena digital a laser (Leica DistoX)	A trena digital a laser melhora a velocidade da coleta de dados, reduz a barreira para ensinar novos espeleólogos a fazer o levantamento e elimina ou reduz o potencial de muitos tipos de erros na coleta de dados. Assim como as bússolas, as trenas a laser são influenciadas pela interferência do campo magnético terrestre. Dessa forma, pilhas, baterias, partes metálicas ou até mesmo rochas que contenham minerais magnéticos (ex: magnetita) costumam causar erros significativos nas leituras, sendo comuns em cavidades situadas em formações ferríferas. Além disso, a trena digital a laser possui ótima relação custo-benefício e possui manuseio simples. Apresenta precisão de cerca de 3mm e 0,5° para distâncias e ângulos verticais e horizontais, respectivamente.	Pode ser aplicada em qualquer tipo de caverna. Porém, como a calibração da trena a laser é complexa e esse equipamento possui elevada sensibilidade a interferências magnéticas, sejam elas provenientes de minerais/rochas ou de equipamentos metálicos usados pelo espeleólogo, o equipamento não é o mais adequado para ser utilizado em cavidades situadas em formações ferríferas ou litotipos contendo minerais com susceptibilidade magnética.
Escanejamento a laser 3D	O escaneamento a laser 3D utiliza ferramentas portáteis de mapeamento móvel, é capaz de obter detalhes diferentes do sistema tradicional (que podem garantir muito mais precisão e maior definição), sendo possível reconstruir em três dimensões os ambientes subterrâneos com maior semelhança com a realidade de cada cavidade. Além disso, se houver boas condições de iluminação no interior da caverna, uma imagem digital em cores verdadeiras da nuvem de pontos pode ser obtida. Os dispositivos utilizados para o escaneamento 3D, além de mais caros, muitas vezes também exigem treinamento específico muitas vezes complexo e demandam mais tempo para o levantamento em campo e processamento da nuvem de pontos na etapa pós-campo, em especial em cavernas com dimensões notáveis (centenas a milhares de metros). Além disso, são muito suscetíveis a danos nos equipamentos em alguns ambientes cavernícolas e podem possuir a mobilidade mais limitada em comparação ao método tradicional. Como a obtenção das variáveis espeleométricas é influenciada pela quantidade de cortes e pelo grau de inclinação das galerias, a utilização do escaneamento a laser 3D é capaz de corrigir essas discrepâncias, que se tornam maiores utilizando a técnica convencional. As imagens tridimensionais das cavernas produzidas por essa técnica, aliado aos programas específicos para tratamento dos dados coletados em campo, permitem cálculos precisos de áreas, volume e podem fornecer seções transversais em qualquer	É mais adequado para o mapeamento topográfico de cavernas de grandes dimensões, com grandes salões e condutos de fácil acesso. É necessário que os condutos entre galerias tenham no mínimo 50 cm x 50 cm para a instalação do equipamento. Com a aplicação desse método ainda é muito difícil topografar grandes abismos e cavernas com presença de água subterrânea. Porém, novas versões de scanner 3D são portáteis eliminando grande parte dessas limitações. Como não apresenta susceptibilidade magnética, esse método é adequado para aplicação em cavidades situadas em formações ferríferas.

	lugar da cavidade. Porém, para a geração desses produtos cartográficos espeleológicos é preciso desenhar os elementos a partir da nuvem de pontos obtida, demandando mais tempo. Apresenta precisão milimétrica para a obtenção de distâncias.	
Fotogrametria	A fotogrametria é uma técnica que permite construir produtos mais precisos do que os métodos convencionais, sendo mais acessível, com maior mobilidade e menor custo, quando comparada com o escaneamento a laser. Esse método por ser associado a captura de imagens pode obter com grande resolução, em cores, a geometria e orientação espacial das feições cársticas encontradas, tais como: estruturas geológicas, espeleotemas, pinturas rupestres, litotipos, além de aspectos geológicos, biológicos, históricos e arqueológicos gerais. A utilização da fotogrametria pode não se mostrar eficaz em cavidades com grande desenvolvimento linear, locais com difícil deslocamento, entradas com vegetação expressiva ou com a existência de extensos corpos d'água. Essas condições citadas podem impactar na iluminação mínima necessária para esse tipo de levantamento, servir como obstáculo para a câmera ou até mesmo refletir o imageamento, como ocorre em cavernas com a presença de água. Apresenta precisão milimétrica para a obtenção de distâncias.	Pode ser utilizada em cavernas com condutos de fácil acesso pelo ser humano e com iluminação natural ou artificial adequada para a realização do imageamento. Além de locais com a inexistência ou com pequenas concentrações de blocos de rocha, sedimentos ou grandes volumes de água, pois podem servir de obstáculo para o levantamento topográfico. Como não apresenta susceptibilidade magnética, esse método é adequado para aplicação em cavidades situadas em formações ferríferas.

7. Considerações Finais

O mapeamento de cavidades, juntamente com os registros fotográficos, são os dados mais básicos sobre cavernas. Todas as investigações geológicas, biológicas, arqueológicas e históricas precisam de mapas base para subsidiar as observações e interpretações realizadas em campo. Vale destacar que o método tradicional de levantamento topográfico de cavernas é utilizado até hoje por diversos grupos de espeleologia no Brasil e no mundo e ainda geram milhares de produtos cartográficos que são muito úteis para a sociedade. No entanto, o método convencional está sendo rapidamente substituído pelos levantamentos topográficos mais modernos em empresas de consultoria ambiental e no setor mineral.

É importante ressaltar que a criação do Leica DistoX, aplicando a trena digital a laser dentro do mundo espeleológico, foi um dos maiores avanços tecnológicos obtidos para o mapeamento topográfico de cavernas. Dessa forma, tornou-se mais fácil o levantamento topográfico, aumentando a quantidade e qualidade das medidas obtidas. Porém, as outras técnicas modernas (escaneamento a laser e fotogrametria) aplicadas a topografia de cavernas conseguem extrapolar os levantamentos para um modelo em três dimensões e se mostram como alternativas muito eficazes, principalmente quando associadas aos mapeamentos de campo. Além disso, esses métodos inovadores podem ser utilizados como forma de validação dos dados em uma etapa pós-campo em um ambiente de realidade virtual (RV). Essa disponibilização em RV acarretou a redução da quantidade de pessoas expostas aos riscos de segurança e diminuição do custo total da atividade.

Apesar dos inúmeros avanços tecnológicos aplicados ao levantamento topográfico de cavernas, ainda há muito o que ser feito. Dentre os pontos de melhoria que ainda estão latentes incluem o grande volume de dados das nuvens de pontos 3D, a complexidade dos *software* para processamento das nuvens 3D e a dificuldade de acesso em determinados condutos das cavidades. Vale destacar também que o mundo subterrâneo possui uma série de feições complexas que nem sempre podem ser reproduzidas de forma fidedigna nos modelos matemáticos que comandam os sistemas de medição. Dessa forma, muitas vezes os modelos não poderão ser replicados para uma série de cavernas, devido a especificidade das feições de cada uma.

Um ponto relevante é que os três sistemas de classificação para os graus de precisão topográfica (BCRA, IUS e ASF) ainda não contemplam os métodos de levantamento espeleotopográfico modernos. Dessa forma, eles

precisam ser revisados para conseguir comparar métodos e precisão, abrangendo as novas tecnologias existentes que são aplicadas ao mapeamento topográfico de cavernas.

Assim, para estudos futuros torna-se necessário realizar a comparação do levantamento topográfico via metodologia convencional com os das técnicas modernas em cavernas com geometrias complexas, grandes salões, condutos sinuosos e com vários níveis com o intuito de confrontar os resultados espeleométricos e analisar as vantagens e desvantagens em uma abordagem prática para o tema.

Contribuições dos Autores: A.B.F. e G.S.B.: levantamento bibliográfico, materiais e métodos, contexto histórico, comparação entre topografia convencional e moderna e escrita do artigo; R.P.B.: revisão, validação e análise crítica do artigo; I.V.B.: disponibilização de material bibliográfico, validação e revisão do artigo; R.N.A.: disponibilização de material bibliográfico, levantamento espeleotopográfico moderno, validação e revisão do artigo; B.S.S.: disponibilização de material bibliográfico, levantamento espeleotopográfico convencional, validação e revisão do artigo; T.R.C.: disponibilização de material bibliográfico, levantamento espeleotopográfico moderno, validação e revisão do artigo. Todos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: À empresa Vale S.A. pelo incentivo a pesquisa e preservação do patrimônio espeleológico brasileiro e ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela oportunidade de desenvolvimento dessa pesquisa a nível de pós-graduação. Aos revisores do artigo pelo tempo despendido e pelas relevantes contribuições.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. Controle morfológico de cavidades com a utilização de laser scanner. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33., 2015, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE. 2015. p.321-327. ISSN 2178-2113.
2. ARAÚJO, R. N. **Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016. 130p.
3. ARNBERGER, E. **Handbuch der thematischen Kartografie.** 1ª Ed. Wien: Deutike, 1966. 554p.
4. AULER, A. Espeleologia no Brasil: Uma abordagem histórica. **Espeleo-Tema**, v.18, p.23-30, 1997.
5. AULER, A. S.; RUBBIOLI, E.L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil.** 1ª Ed. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 227p.
6. AULER, A. S.; ZOGBI, L. A. **Espeleologia: Noções Básicas.** 1ª Ed. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 103p.
7. BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Presidente da República, 1988.
8. BRASIL. **Decreto Federal nº 6.640 de 7 de novembro de 2008.** Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2008.
9. BUCKLEY, S.J.; HOWELL, J.A.; ENGE, H.D.; KURZ, T.H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. **Journal of the Geological Society**, v.165, p. 625- 638, 2008. DOI: 10.1144/0016-76492007-10
10. CONAMA. **Resolução CONAMA nº 005, de 6 de agosto de 1987, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.** Aprova o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1987.
11. CORVI, M. **DistoX and TopoDroid Calibration, precision, accuracy - Version 2020.10.10.** 2020. Disponível em: < <https://ia802904.us.archive.org/27/items/distoxandtopodroid/DistoXAndTopoDroid.pdf> >. Acesso em: 03 jun. 2022.
12. FIGUEIREDO, L.A.V. de. História da Espeleologia Brasileira: protagonismo e atualização cronológica. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), p.379-395.
13. GALDEANO, M.G.; MUNIZ, F.G.; PETERSEN, C.; SEBASTIÃO, C.; SOARES, L.M.; REZENDE, B. Aplicação do Laser Scanner 3D como Ferramenta de Interpretação de Dados Litoestruturais em Cavidade Natural localizada na Serra do Curral-MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. 2016. p.1.
14. GALLAY, M.; KANUK, J.; HOCHMUTH, Z.; MENEELY, J.D.; HOFIERKA, J.; SEDLAK, V. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. **International Journal of Speleology**, v. 44, p. 277-291, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.6
15. GROHMANN, C.H.; ZACHARIAS, G.; GARCIA, G.P.B.; BARALE, F.; ALMEIDA, F.V.; ARNONE, I.S. Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser scanner: resultados preliminares. In: Congresso

- Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Campinas. **Anais...** Campinas: SBE. 2019. p.201-206. Disponível em: <<http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe201-206.pdf>>. Acesso em: 03 jun 2022.
16. GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. 902 p.
 17. HEBB, B. **Paperless Caving Surveying**. 2010. Disponível em: <<http://paperless.bheeb.ch/>>. Acesso em: 02 jun 2022.
 18. HELLER, M.; NEUMANN, A. **Inner-Mountain Cartography-From Surveying Towards Information Systems**. Disponível em: <https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2001/icc2001/file/f28008.pdf>. 2001. Acesso em: 15 mai 2022.
 19. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Downloads Geociências**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-doterritorio/malhas/territoriais/15774malhas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 23 mar 2022.
 20. ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2011. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf>>. Acesso em: 21 out 2022.
 21. ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/publicacoes/107-anuario-do-patrimonio-espeleologico.html>>. Acesso em: 27 fev 2022.
 22. KLEMUN, M. *Verwaltete Wissenschaft: Instruktionen und Forschungsreisen*. In: HIPFINGER A.; LÖFFLER J.; NIEDERKORN J. (Ed.), **Ordnung durch Tinte und Feder? Genese und Wirkung von Instruktionen im zeitlichen Längsschnitt vom Mittelalter bis zum 20. 1ª Ed.** Wien: Böhlau & Oldenbourg, 2012. p. 391-412.
 23. KYRLE, G. **Grundriss der Theoretischen Speläologie**. 1ª Ed. Wien: Österreichische Staatsdruckerei, 1923. 353 p.
 24. LEE, E.F. **Map of the Mammoth Cave: Accompanied with notes**. Cincinnati: Doolittle & Munson, 1835. Dimensões 52 x 61 cm. Escala 1:3000. Disponível em: <<https://www.loc.gov/item/2006626050/>>. Acesso em: 19 mai. 2022.
 25. LERMA, J.; BIOSCA, J. **Teoria y practica del Escaneado Laser Terrestre**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008. 253p. Disponível em: <<http://www.jllerma.webs.upv.es/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
 26. LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**. 1ª Ed. São Paulo: Rios, 1989. 279p.
 27. LOTT, C. F. S. Cartografia espeleológica: dos mapas primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. **Pedagogia em Ação**, v. 5, n. 1, p. 82-101, 2013.
 28. LÜDEMANN, K. Ein Universalinstrument für die Höhlenmessung. **Mitteilungen des Hauptverbands Deutscher Höhlenforscher**, v. 5, n. 2, p. 50-56, 1927.
 29. MAGALHÃES, E. D.; LINHARES, J.C. **Curso Prático de Topografia - Espeleo Grupo de Brasília (EGB)**. 1ª Ed. Brasília: Espeleo Grupo de Brasília (EGB), 1997. 43p. Disponível em: <<https://www.portalagrimensura.com/cloud/download/dXBsb2Fkcy9hcG9zdGlsYXMvdG9wb2dyYWZpYS1kZS1jYXZlc m5hLnBkZg==/h/653dea909cb6ff1b3091ede70f125d1c>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
 30. MATTES, J. Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 3, p. 251-266, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.4
 31. MATTHEWS, N. A. **Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource documentation, Interpretation, and Preservation**. Colorado: U.S Department of Interior, 2008. 62p. Technical Note 428.
 32. NAGEL, J.A. **Beschreibung deren auf allerhöchsten Befehl Ihre Röm. kaiserlichen königlichen Maytt. Francisci I untersuchten, in dem Herzogthume Crain befindlichen Seltenheiten der Natur**. Austrian National Library, manuscript-code: 7854. 1748.
 33. OEDL, R. Auswertungsmöglichkeiten von Höhlenvermessungen. **Speläologisches Jahrbuch**, v. 3, p. 138-144, 1923.
 34. PUKANSKÁ, K.; BARTOŠ, K.; BELLA, P.; GAŠINEC, J.; BLISTAN, P.; KOVANIČ, L. Surveying and High-Resolution Topography of the Ochtiná Aragonite Cave Based on TLS and Digital Photogrammetry. **Applied Sciences**. v. 10, n. 13, p. 1-19, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app10134633>>. Acesso em: 28 jul. 2022. (2020). DOI: 10.3390/app10134633
 35. REISNER, H. Anleitung zur Aufnahme von Grundrißplänen, Längen- und Querprofilen in Höhlen. **Berichte der staatlichen Höhlenkommission**, v. 2, p. 10-24, 1921.
 36. RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de Cavernas – Guia Prático**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Redespeleo Brasil, 2005. 93p.
 37. RUBBIOLI, E.; AULER, A. S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo**. 1ª Ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 340p.
 38. SALUM, M. J. G. Cavidades Naturais Subterrâneas: Desafio para a Mineração de Ferro. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 43., 2013, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABM. 2013. p. 146-158. DOI: 10.5151/2594-357X-23799

39. SCHMIDL, A. Die Untersuchung einiger Höhlen im Karst. Jahrbuch der k. k. **Geologischen Reichsanstalt**, v. 1, p. 701-705, 1850.
40. SCHMIDL, A. **Zur Höhlenkunde des Karstes**. Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas. Mit Beiträgen von Alois Pokorny, Johann Rudolf Schiner und Wilhelm Zippe. 1ª Ed. Wien: Wilhelm Braumüller, 1854. 317p.
41. SHAW, T.R. Adolf Schmidl (1802-1863). The father of modern speleology? **International Journal of Speleology**, v. 10, p. 253-267, 1978.
42. SHAW, T.R. **Foreign travellers in the Slovene karst 1486–1900**. 1ª Ed. Ljubljana: Karst Research Institute at ZRC SAZU, 2008. 338p.
43. SILVA, M.M.; SILVA, M.A.D.; MARTINS, G.D. Fotogrametria terrestre aplicada à espeleotopografia: Estudo de caso na Gruta do Urubu (Coromandel-MG). In: Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais, 8., 2020, Monte Carmelo. **Anais...** Monte Carmelo: UFU. 2020.
44. SIMÕES, P.R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE. 2019 p.229-237. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.
45. SIMÕES, P.R.G.; VEIGA, L.A.K.; SCHMIDT, M.A.R. Automação de processos no mapeamento espeleológico 3D a partir de modelos fotogramétricos de cavidades subterrâneas em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira e Espeleologia**, v.11, n. 1, p. 87–116, 2022. DOI: <https://doi.org/10.37002/rbsp.v1i11.2319>.
46. SUTTON, M. A History of map-making at Mammoth Cave. In: HOBBS III, H.H.; OLSON, R.A.; WINKLER, E.G.; CULVER, D.C. (Ed.). **Mammoth Cave: A Human and Natural History**. 1ª Ed. Cham: Springer, 2017. p. 77–95.
47. TME. **Telémetro Laser: como funciona e qual escolher?**. 2019. Disponível em: <<https://www.tme.com/br/pt/news/library-articles/page/21956/Telemetro-laser-como-funciona-e-qual-escolher/>>. Acesso em: 23 jun. 2022.
48. VACCARI, E. The organized traveler. Scientific instructions for geological travels in Italy and Europe during the eighteenth and nineteenth century. In: WYSE JACKSON, P.N. (Ed.). **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287ª Ed. London: Geological Society, 2007, p. 7-17. DOI: 10.1144/SP287
49. VALE S.A. **Estudos Ambientais para Mapeamento Topográfico de Cavidades Naturais Subterrâneas próximas a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2009.
50. VALE S.A. **Workshop - Revisão dos atributos espeleométricos e atualização da relevância de nove cavidades**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2021.
51. VILLASENÍN, S. P.; DOCAMPO, M.G.; SANZ, J.O. 3-D Modeling of Historic Façades Using SFM Photogrammetry Metric Documentation of Different Building Types of a Historic Center. **International Journal of Architectural Heritage**. v.11, n.6, p.871–890, 2017. DOI: 10.1080/15583058.2017.1317884
52. WESTOBY, M.J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; REYNOLDS, J.M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jul. 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021
53. WOOD, J.; TOOMEY, R. **Using Photogrammetry and 3D Models to Document Shark Fossils at Mammoth Cave National Park**. Kentucky: National Park Service. 2020. Disponível em: <<https://www.nps.gov/subjects/fossils/using-photogrammetry-and-3d-models-to-document-shark-fossils-at-mammoth-cave-national-park.htm>>. Acesso em: jul. 2022.
54. WOOKEY. Cave Surveying. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 714-717.
55. WYSE JACKSON, P.N. **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287ª Ed. London: Geological Society, 2007. 415 p.
56. ZLOT, R.; BOSSE, M. Three-dimensional mobile mapping of caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 191–206, 2014. Disponível em: <<https://caves.org/pub/journal/PDF/v76/cave-76-03-191.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2022. DOI:10.4311/2012EX0287



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.