



## Comparação entre Métodos de Levantamento Topográfico de Cavernas Ferríferas: Estudo de Caso na Amazônia Brasileira

### *Comparison Between Topographic Surveys of Iron Caves: Case Study in the Brazilian Amazon*

Adam Barros Fernandes<sup>1</sup>, Ricardo Perobelli Borba<sup>2</sup>, Iuri Viana Brandi<sup>3</sup>, Ramon Nunes Araújo<sup>4</sup>, Bruno dos Santos Scherer<sup>5</sup>, Júlio Almeida Moreira<sup>6</sup> e Gabrieli Santos Boulhosa<sup>7</sup>

1 Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. [adambarrosgeo@gmail.com](mailto:adambarrosgeo@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2686-278X>

2 Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. [borba@ige.unicamp.br](mailto:borba@ige.unicamp.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1162-409X>

3 VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. [iuri.brandi@vale.com](mailto:iuri.brandi@vale.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8593-6654>

4 VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. [ramon.araujo@vale.com](mailto:ramon.araujo@vale.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5948-8210>

5 VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. [bruno.scherer@vale.com](mailto:bruno.scherer@vale.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8030-1959>

6 VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. [julio.moreira4@vale.com](mailto:julio.moreira4@vale.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7780-8679>

7 Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil. [gabrieli.boulhosa@gmail.com](mailto:gabrieli.boulhosa@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-0838>

Recebido: 06.2023 | Aceito: 01.2024

**Resumo:** O cálculo dos parâmetros espeleométricos (projeção horizontal, desnível, área e volume) em meio ao mapeamento topográfico de cavernas é um requisito amparado por lei para a definição do grau da relevância de cavidades no Brasil. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é a comparação do método expedito convencional (utilizando bússola, clinômetro, trena e GNSS) com a tecnologia de varredura a laser no que tange ao levantamento topográfico em uma população amostral de cavernas situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, Pará, Brasil. Assim, foi realizada inicialmente a análise estatística descritiva dos dados espeleométricos obtidos matematicamente pelo método de levantamento topográfico convencional de 1758 cavidades para definição do parâmetro espeleométrico mais relevante do ponto de vista de enquadramento de cavernas como de máxima relevância. A partir disso, foi calculado o parâmetro espeleométrico volume levantado via varredura a laser e comparado com o resultado obtido utilizando o método convencional. A varredura a laser trouxe maior rapidez e redução da exposição ao risco em campo na coleta de dados. Além disso, o levantamento topográfico com a varredura a laser é mais preciso e em 80% dos resultados apresentou o valor da variável volume inferior ao obtido por meio do levantamento convencional.

**Palavras-chave:** Espeleometria. Volume. Grau de relevância. Cavidades. Carajás.

**Abstract:** The calculation of speleometric parameters (horizontal projection, height difference, area and volume) in the topographic mapping of caves is a requirement supported by law for the definition of the degree of relevance of cavities in Brazil. Thus, the objective of this work is to compare the conventional expeditious method (using compass, clinometer, tape measure and GNSS) with laser scanning technology regarding the topographic survey in a sample population of caves located in the Speleological Province of Serra dos Carajás, Pará, Brazil. Thus, the descriptive statistical analysis of the speleometric data obtained mathematically by the conventional topographic survey method of 1758 cavities was initially carried out to define the most relevant speleometric parameter from the point of view of cave framing as of maximum relevance. From this, the speleometric parameter volume surveyed by way of laser scanning was calculated and compared with the result obtained using the conventional method. Laser scanning brought greater speed and reduced exposure to risk in the field in data collection. In addition, the topographic survey with laser scanning is more accurate and in 80% of the results the value of the variable volume was lower than that obtained by means of the conventional survey.

**Keywords:** Speleometry. Volume. Degree of relevance. Caves. Carajás.

## 1 INTRODUÇÃO

O mapeamento topográfico de cavernas é uma atividade de destaque dentro da ciência espeleológica. Isso ocorre devido a importância dos mapas, seções transversais, seções longitudinais e até mesmo modelos em 3D para a realização de estudos científicos multidisciplinares sobre as cavidades naturais subterrâneas (RUBBIOLI et al., 2019). Vale apontar que os parâmetros espeleométricos (projeção horizontal - comprimento das galerias projetadas em um plano horizontal; desnível - diferença de nível entre o piso mais alto da caverna e o piso mais baixo; área - área calculada a partir da planta baixa da caverna; volume - valor da área multiplicado pela altura média das seções verticais) obtidos após o mapeamento topográfico das cavernas são essenciais e premissas básicas para a documentação das cavidades abrangidas em processos de licenciamento ambiental (FERREIRA, 2017). Esse fato torna os levantamentos topográficos de cavernas relevantes para a ciência espeleológica e para as atividades econômicas que tenham interferência com o patrimônio espeleológico (BERBERT-BORN, 2010).

Os levantamentos topográficos modernos de caverna são definidos pela utilização de instrumentos diferentes daqueles utilizados pelo método convencional (bússola, clinômetro, trena e GNSS para coleta das coordenadas da entrada da caverna em superfície). Com o avanço tecnológico dos dispositivos empregados na topografia de cavernas, novos métodos foram introduzidos além do levantamento topográfico convencional (método que utiliza basicamente bússola, clinômetro, trena e GNSS para a elaboração de um mapa topográfico bidimensional da cavidade mapeada). Agora, incorporam-se novas abordagens, como a trena digital a laser, a varredura a laser e o mapeamento por meio de imagens (fotogrametria) (FERNANDES et al., 2023).

Conforme ordenação estabelecida pela legislação ambiental brasileira, foram fixadas 4 classes quanto ao grau de relevância para cavidades naturais subterrâneas (máximo, alto, médio ou baixo), sendo levados em consideração vários atributos, tais como: ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local (BRASIL, 2022). É necessária a análise individual de cada um dos atributos encontrados nas cavernas, com o intuito de detectar o seu nível de importância com relação: (i) a unidade geomorfológica, que apresenta continuidade espacial, como serras, morrotes ou sistema cárstico (enfoque local) e (ii) a unidade espeleológica, entendida como a área com homogeneidade fisiográfica que pode congrega diversas formas do relevo cárstico, como dolinas, sumidouros, ressurgências, vales cegos, lapiás e cavernas, que engloba, no mínimo, um grupo ou formação geológica e suas relações com o ambiente no qual se insere (enfoque regional) (BRASIL, 2022).

Para a definição do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas é necessário obter o resultado dos cálculos dos parâmetros espeleométricos previstos como requisito legal pelo Decreto nº 10.935/2022 e detalhado pela Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente. Esses cálculos dos parâmetros espeleométricos são extremamente relevantes tendo em vista que esses atributos são levados em consideração para a classificação do grau de relevância dentro do aspecto de dimensões notáveis em extensão de uma caverna brasileira (MMA, 2017; BRASIL, 2022).

Mesmo com o detalhamento dos cálculos dos parâmetros espeleométricos na legislação ambiental brasileira, a execução desses cálculos não se torna trivial quando possuímos fatores ambientais envolvidos no momento do levantamento topográfico em campo, tais como: dificuldade de acesso e progressão do levantamento topográfico, limitação ao uso de instrumentos de maior precisão, interferência magnética, dentre outros (CALUX et al., 2017).

Dessa forma, ainda atualmente a realização dos cálculos espeleométricos de uma cavidade via levantamento topográfico convencional é muito complexa e envolve um alto grau de incertezas por conta da limitação de alguns equipamentos e pela complexidade de acesso a alguns condutos e salões das cavernas. Por outro lado, a obtenção dos parâmetros espeleométricos de uma caverna, através da varredura a laser, se torna mais rápida e com menos incertezas quando comparado ao método convencional (SIMÕES, 2019).

Nos dias atuais, há dispositivos disponíveis com a capacidade de criar representações tridimensionais (3D) das cavernas com alto grau de precisão e qualidade gráfica. Esse processo de mapeamento gera uma maquete digital extremamente precisa através da análise de uma série de pontos dispostos em três dimensões, frequentemente referidos como “nuvem 3D”. A precisão alcançada chega a níveis da ordem de alguns milímetros e a riqueza de detalhes é suficiente para reproduzir até mesmo as texturas das formações rochosas,

pichações, bem como características morfológicas e estratigráficas presentes (ICMBio, 2019).

Além disso, o resultado é apresentado como um modelo 3D, permitindo uma visualização virtual da disposição e formato das passagens subterrâneas. No entanto, é válido mencionar que esses equipamentos ainda têm custos elevados e são delicados, o que limita sua aplicação indiscriminada em qualquer caverna. Contudo, quando se trata de cavernas onde é essencial a aquisição de dados com alta precisão, essa tecnologia representa o estado-da-arte (ZLOT; BOSSE, 2014; GALLAY et al., 2015; GALDEANO et al., 2016; ICMBio, 2019).

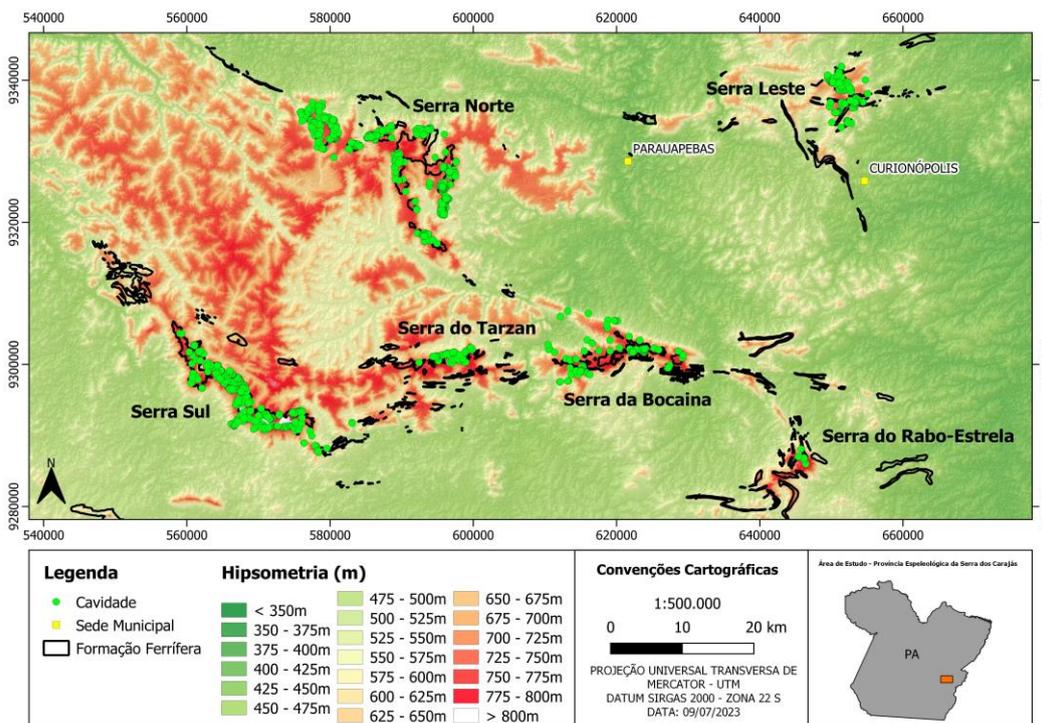
Assim, apesar da evolução ocorrida nos últimos anos com relação ao mapeamento topográfico de cavernas no Brasil e no mundo, ainda há muito o que ser feito em relação a aplicação e entendimento sobre novas tecnologias. O presente estudo tem como objetivos (i) a determinação do parâmetro espeleométrico volume como de maior importância para a definição de cavernas de máxima relevância na área de estudo (ii) e a comparação dos métodos convencional e por varredura a laser no levantamento topográfico de uma população amostral de cavernas situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com o intuito de mitigar as incertezas do levantamento topográfico convencional. Para que isso fosse possível esse trabalho utilizou análises estatísticas e comparação entre os dados calculados do parâmetro espeleométrico volume utilizando a técnica convencional e por varredura a laser.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

As cavernas do presente estudo estão situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, no sudeste do estado do Pará. A Serra dos Carajás abriga depósitos minerais de classe mundial dos metais Fe, Mn, Au, Al, Cu, Sn, Ni, Cr, Pt, entre outros. As jazidas de ferro são hospedadas em uma seqüência metavulcanossedimentar do Grupo Grão Pará ao longo de um conjunto de serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, que são foco deste estudo (Figura 1). Nesse grupo predominam rochas vulcânicas máficas sobrepostas e sotopostas aos jaspilitos e corpos de minério de ferro de alto teor (> 64%) (LOBATO et al., 2005).

Figura 1 – Localização das cavidades estudadas e das Serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, Província Espeleológica da Serra dos Carajás (PA).



Fonte: Os autores (2023). Banco de dados: Vale S. A. (2021).

## 2.2 Procedimentos Metodológicos

Para o desenvolvimento do escopo proposto, foi utilizada uma metodologia organizada em 3 etapas principais, conforme os procedimentos descritos a seguir:

- a) Etapa 1: análise estatística descritiva dos parâmetros espeleométricos projeção horizontal (PH), desnível, área e volume levantados através do mapeamento topográfico convencional de 1758 cavernas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás;
- b) Etapa 2: cálculo dos valores do parâmetro espeleométrico volume a partir dos mapas topográficos (método convencional) e do sólido 3D gerado a partir da nuvem de pontos (método de varredura a laser);
- c) Etapa 3: comparação dos resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume e análise das inconsistências entre os dois métodos de levantamento topográfico de modo a subsidiar a mitigação das incertezas do levantamento topográfico convencional.

### 2.2.1 ETAPA 1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na primeira etapa de análise estatística foi realizado o processo de obtenção, organização e interpretação dos dados quantitativos de espeleometria (projeção horizontal, desnível, área e volume) angariados pelo método de levantamento topográfico convencional de uma amostra de cavernas situada na Província Espeleológica da Serra dos Carajás. É importante ressaltar que o banco de dados utilizado foi disponibilizado pela empresa Vale S.A. e foram obtidos para fins de licenciamento ambiental (VALE S.A., 2023).

Vale destacar que a Instrução Normativa (IN) 2/2017, lista os atributos e seus respectivos conceitos a serem considerados para fim da classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Para o grau de relevância máximo com relação ao atributo “dimensões notáveis em extensão, área e/ou volume” é definido que a cavidade apresente extensão (horizontal ou vertical), área ou volume superiores a 8 vezes a mediana (8.Md) relativo ao enfoque local ou regional (MMA, 2017). Já no que se refere aos graus de relevância entre baixo, médio e alto eles também são definidos em relação aos mesmos atributos espeleométricos. Porém, eles são classificados quanto ao resultado de cada atributo em uma determinada caverna em relação a outras cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica, considerando os percentis 20 e 50 do conjunto de dados. Desse modo, para fins de classificação do grau de relevância, os valores menores ou iguais ao percentil 20 são de baixa relevância, valores entre os percentis 20 e 50 correspondem a média relevância e valores superiores ou iguais ao percentil 50 são de alta relevância (MMA, 2017).

Da lista de atributos para a classificação do grau de relevância de cavernas proposto pela IN 2/2017 foram selecionados 4 (quatro) atributos (projeção horizontal, desnível, área e volume) para a análise estatística, por serem variáveis quantificáveis e passíveis de alterações a depender da metodologia de levantamento topográfico empregada. Seguem os atributos e suas respectivas definições, conforme a Instrução Normativa supracitada:

- a) Projeção Horizontal (m): Soma da projeção horizontal dos eixos de desenvolvimento da cavidade;
- b) Desnível (m): Diferença entre a cota do piso mais alta e a mais baixa da cavidade;
- c) Área (m<sup>2</sup>): Área da projeção da cavidade calculada em superfície horizontal (planta);
- d) Volume (m<sup>3</sup>): Volume da cavidade obtido com base na multiplicação da área da projeção horizontal com a altura média das seções verticais.

Para o presente estudo as análises estatísticas foram realizadas com base nos preceitos da análise descritiva. A análise estatística descritiva é o processo em que é possível resumir e descrever as características de um conjunto de dados. Isso inclui o cálculo de medidas de tendência central (média e mediana) e medidas de dispersão (desvio padrão e variância).

Considerando os atributos espeleométricos da amostra local e regional das cavidades da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com foco na definição das cavernas com grau de relevância máximo, conforme o inciso II do parágrafo 4º do art. 2º do decreto 10.935/2022 (BRASIL, 2022), foi realizada análise

estatística completa com enfoque regional e local, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de categorias locais consideradas para a análise estatística das cavidades da Província Espeleológica da Serra dos Carajás.

Enfoque Regional	Enfoque Local (Unidade Geomorfológica - UG)	Quantidade de Cavernas
Serra dos Carajás	UG Serra Norte	794
Serra dos Carajás	UG Serra Sul	554
Serra dos Carajás	UG Serra da Bocaina	123
Serra dos Carajás	UG Serra Leste	220
Serra dos Carajás	UG Serra do Rabo-Estrela	7
Serra dos Carajás	UG Serra do Tarzan	60
Total	6	1758

Fonte: Os autores (2023).

## 2.2.2 ETAPA 2 – CÁLCULO DO PARÂMETRO ESPELEOMÉTRICO VOLUME

Após a etapa 1 foram obtidos os valores calculados do parâmetro espeleométrico volume de uma amostra escolhida de forma aleatória utilizando o *software Microsoft Excel*, sendo obtido um total de 60 cavernas dentro do grupo de cavernas da Etapa 1 (1758 cavidades), a partir dos mapas topográficos (método convencional) e do sólido 3D gerado a partir da nuvem de pontos (método de varredura a laser). Vale destacar que esses dados foram obtidos através da análise de relatórios técnicos disponibilizados pela empresa Vale S.A. (TETRA TECH, 2018). É importante ressaltar que foi selecionado o parâmetro espeleométrico volume, pois ele possui grande importância do ponto de vista de enquadramento de cavernas como de máxima relevância no que se refere aos aspectos de dimensões notáveis, conforme constatado nesse presente trabalho.

Com o intuito de obter o volume de uma cavidade por intermédio do método convencional de levantamento topográfico foram utilizados os seguintes equipamentos: bússola, clinômetro, trena e GNSS para coleta das coordenadas da entrada da caverna em superfície. Por meio desse levantamento topográfico foi possível obter um grau de precisão BCRA-5D (Classificação de detalhe para mapeamento topográfico de cavernas, conforme a *British Cave Research Association - BCRA*). Com base nos dados obtidos em campo utilizando o método convencional é necessário inicialmente calcular a área da representação em planta da caverna, que foi mensurada no presente estudo através do programa *AutoCAD 2019*. Vale destacar também que locais não acessíveis por seres humanos e pilares devem ser descontados nas medições (ICMBio, 2019), conforme mostrado na Eq. (1).

$$Sph = St - Sp \quad (1)$$

Onde:

Sph é a área da projeção horizontal

St é a área total da planta

Sp são as áreas dos pilares

Além da variável área, é necessário também calcular a altura média da caverna, que neste estudo é obtida através da média de várias alturas equidistantes. Vale destacar que a precisão no cálculo da altura média está diretamente relacionada com o a quantidade e a distância entre as seções verticais (cortes) obtidas no levantamento topográfico em campo (ICMBio, 2019). Logo, para a mensuração do volume final da caverna é necessário multiplicar a área da projeção horizontal com a altura média das seções, conforme mostrado na Eq. (2).

$$V = Sph((\Delta h1 + \Delta h2 + \Delta h3 + \dots + \Delta hn)/n) \quad (2)$$

Onde:

V é o volume

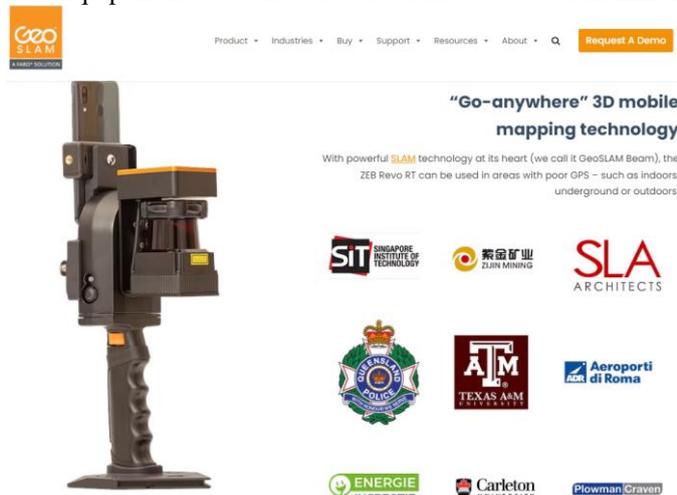
Sph é a área da projeção horizontal

$\Delta h$  é a altura das seções

n é o número de seções

Dessa forma, para realização do levantamento topográfico, via varredura a laser, das cavidades em campo foi utilizado o equipamento Geoslam ZEB Revo (Figura 2). Por se tratar de um aparelho móvel, este equipamento tem como diferencial o fácil manuseio em ambientes com restrição de movimentos, por exemplo, cavernas com pequenas dimensões em que é necessário rastejar. Além disso, esse equipamento apresenta capacidade de leitura de 43.000 pontos por segundo, precisão de 6mm em um alcance de até 30m, registro automático de varreduras em campo e processamento em tempo real.

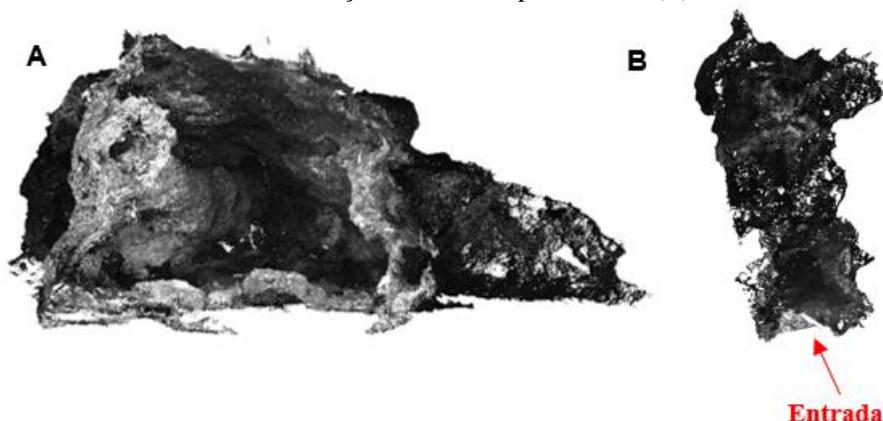
Figura 2 – Equipamento de varredura a laser modelo Geoslam ZEB REVO.



Fonte: Geoslam (2023).

Vale destacar também que o equipamento Geoslam ZEB REVO permite a obtenção de uma nuvem de pontos, que após georreferenciada e tratada em softwares específicos pode dar origem a um modelo 3D, onde é possível obter os dados espeleométricos, assim como o contorno das cavidades. Dessa forma, para o cálculo do parâmetro volume através do método de varredura a laser foram utilizadas como base as nuvens com milhões a dezenas de milhões de pontos geradas pelos escaneamentos, disponibilizadas pela empresa Vale S.A., sendo possível produzir após poucas horas (1 a 5h) de tratamento das nuvens as superfícies em 3D com o auxílio do *software 3DReshaper* (Figura 3). Através desse *software* juntamente com o *AutoCAD 2019* foram gerados tanto os mapas topográficos quanto os cálculos espeleométricos, que foram capazes de atingir o nível de detalhe BCRA-XD (Classificação de detalhe para mapeamento topográfico de cavernas, conforme a *British Cave Research Association - BCRA*).

Figura 3 - Nuvem com cerca de 2 milhões de pontos gerada através do levantamento topográfico de uma cavidade utilizando o equipamento laser scanner portátil modelo Geoslam ZEB REVO. Visão frontal da entrada da caverna (A); Visão da seção horizontal - planta baixa (B).



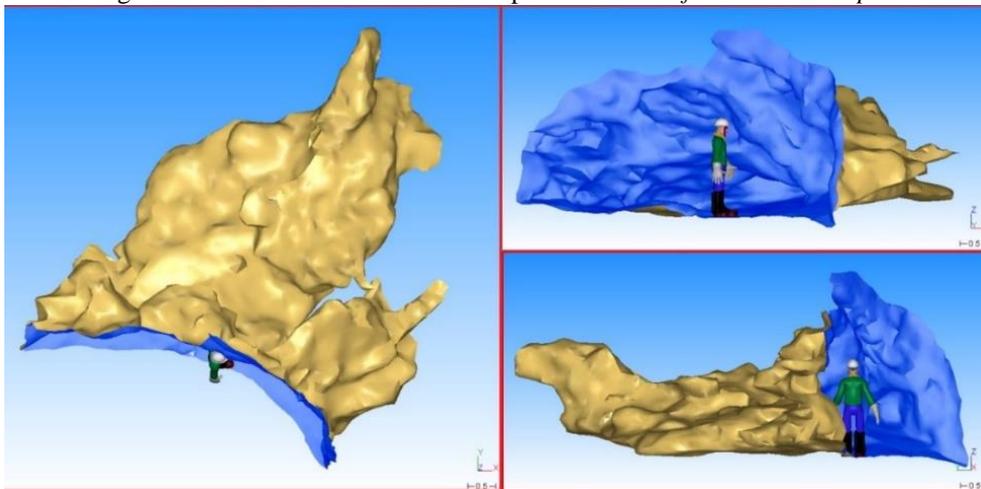
Fonte: Os autores (2023).

O *software 3DReshaper* foi utilizado para o tratamento das nuvens de pontos e geração da malha tridimensional. Primeiramente é necessário realizar o processo de “limpeza” da nuvem, como por exemplo a

remoção de pessoas ou vegetação que estejam incluídas na nuvem de pontos dentro das cavernas. Após essa retirada de alguns pontos da varredura, torna-se necessário o preenchimento desses vazios (sombrias), que são estimados por meio algoritmos através da interpolação dos pontos mais próximos (TECHNODIGIT, 2018).

Após o tratamento da nuvem é possível gerar uma malha triangular 3D a partir dos vértices existentes da nuvem processada (Figura 4).

Figura 4 - Modelo 3D de uma caverna produzido no *software 3DReshaper*.



Fonte: Tetra Tech (2018).

Após finalizar o processo de criação da estrutura tridimensional, a partir da nuvem de pontos processada, procedeu-se aos cálculos de volume das cavidades. Esses cálculos foram fundamentados no conceito de cálculo integral, seguindo as premissas da Eq. (2) (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

Partindo da entrada da caverna são construídos prismas triangulares com base nos vértices da malha triangular. Mesmo que algum dos triângulos se estendam parcialmente além da estrutura (devido à sua configuração global), isso é sempre contrabalançado por outros triângulos. Para garantir a eficiência e precisão matemática desse método é essencial que a estrutura esteja completamente fechada, sem qualquer abertura (ARAÚJO et al., 2015). Abaixo, de forma simplificada, encontra-se a fórmula empregada pelo programa para a realização dos cálculos volumétricos, conforme mostrado na Eq. (3).

$$V = \sum_{i=1}^n F_i * h_{mi} \quad (3)$$

Onde:

i é o triângulo de referência

n é a quantidade de triângulos analisados

F<sub>i</sub> é a área do triângulo i

h<sub>mi</sub> é a altura média do triângulo i

V é o volume de uma caverna

### 2.2.3 ETAPA 3 - COMPARAÇÃO - MÉTODO CONVENCIONAL X VARREDURA A LASER

Como última etapa do trabalho, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos através do levantamento topográfico convencional e o escaneamento utilizando o laser scanner 3D para fins de cálculo volumétrico, com o intuito de verificar o quão discrepante os resultados do método convencional são em relação à varredura a laser. Sendo utilizada a premissa de que o segundo método é mais preciso que o primeiro para a obtenção da variável volume, pelo fato de utilizar um número infinitamente maior de seções topográficas no cálculo da integral, conforme constatado por Araújo et al., (2015).

### 3 ESTUDO DE CASO NA PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DA SERRA DOS CARAJÁS

#### 3.1 Análise Estatística Descritiva

##### 3.1.1 ENFOQUE REGIONAL

No enfoque regional, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 2. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque regional da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 1758 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ( $N > 8.Md = 519$  cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo ( $8.Md - 8$  vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque regional como igual a  $488m^3$  para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

Tabela 2 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Regional.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	33	3,9	112	203
Erro padrão	1	0,1	4	9,6
Mediana	17,5	2,4	46	61
Modo	10	1	20	17
Desvio padrão	42	5,7	187	404
Variância da amostra	1794	33	35154	163799
Curtose	16	244	22	30
Assimetria	3,5	11	4	4,6
Intervalo	362	149	2217	4474
Mínimo	5	0,03	1,2	3
Máximo	367	150	2218	4477
Soma	56968	6966	198393	357027
Contagem (N)	1758	1758	1758	1758
Nível de confiança (95%)	1,9	0,26	8,7	19
8.Md (máxima relevância)	140	-	370	488
Quantidade de Cavidades ( $N \leq 8.Md$ )	1696	-	1402	1237
Quantidade de Cavidades ( $N > 8.Md$ )	60	-	354	519

Fonte: Os autores (2023).

##### 3.1.2 ENFOQUE LOCAL – SERRA NORTE

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Norte, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 3. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Norte) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 794 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ( $N > 8.Md = 93$  cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo ( $8.Md - 8$  vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Norte) como igual a  $632m^3$  para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

Tabela 3 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra Norte.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	38	4,9	142	271
Erro padrão	1,7	0,1	7,7	17
Mediana	20	3	55	79
Modo	10	2,1	20	15
Desvio padrão	49	5,5	219	491
Variância da amostra	2375	30	48162	241318
Curtose	11	16	11	19
Assimetria	3	3,3	3	3,7
Intervalo	349	53,9	1566	4473
Mínimo	5	0,1	1,2	4
Máximo	354	54	1568	4477
Soma	30608	3912	113200	215605
Contagem (N)	794	794	794	794
Nível de confiança (95%)	3,3	0,3	15	34
8.Md (máxima relevância)	161	-	443	632
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	762	-	720	701
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	32	-	74	93

Fonte: Os autores (2023).

### 3.1.3 ENFOQUE LOCAL – SERRA SUL

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Sul, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 4. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Sul) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 554 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ( $N > 8.Md = 62$  cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Sul) como igual a 352m<sup>3</sup> para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

### 3.1.4 ENFOQUE LOCAL – SERRA DA BOCAINA

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra da Bocaina, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 5. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra da Bocaina) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 123 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ( $N > 8.Md = 11$  cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra da Bocaina) como igual a 528m<sup>3</sup> para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

Tabela 4 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra Sul.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	28	3	94	154
Erro padrão	1,6	0,1	7,4	14
Mediana	15	2,1	36	44
Modo	11	1	31	7
Desvio padrão	39	3,8	174	350
Variância da amostra	1546	14	30560	123180
Curtose	22	27	47	50
Assimetria	4,1	4,5	5,6	5,9
Intervalo	362	34	2213	4238
Mínimo	5	0,03	4,6	3
Máximo	367	34	2218	4241
Soma	15940	1703	52173	85699
Contagem (N)	554	554	554	554
Nível de confiança (95%)	3,2	0,3	14	29
8.Md (máxima relevância)	122	-	292	352
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	535	-	519	492
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	19	-	35	62

Fonte: Os autores (2023).

Tabela 5 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra da Bocaina.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	29	2,6	104	157
Erro padrão	3,4	0,2	13	20
Mediana	17	1,8	48	66
Modo	9,4	0,8	43	17
Desvio padrão	37	2,3	146	223
Variância da amostra	1422	5,5	21468	49829
Curtose	11	4	8,1	6,6
Assimetria	3,1	1,9	2,7	2,5
Intervalo	214	11	807	1206
Mínimo	5,3	0,4	10,3	6
Máximo	220	11	817	1212
Soma	3627	326	12793	19314
Contagem (N)	123	123	123	123
Nível de confiança (95%)	6,7	0,4	26	39
8.Md (máxima relevância)	137	-	384	528
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	119	-	114	112
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	4	-	9	11

Fonte: Os autores (2023).

### 3.1.5 ENFOQUE LOCAL – SERRA LESTE

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Leste, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 6. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Leste) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 220 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância (N > 8.Md = 19 cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a

classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Leste) como igual a 388m<sup>3</sup> para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

Tabela 6 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra Leste.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	24	3,6	70	126
Erro padrão	1,7	0,6	6	14
Mediana	15	2	34	48
Modo	6,6	1,8	17	9
Desvio padrão	26	10,2	90	215
Variância da amostra	688	105	8100	46235
Curtose	8,9	190	15	19
Assimetria	2,7	13	3,2	3,8
Intervalo	160	149	723	1662
Mínimo	5	0,3	6,4	4
Máximo	165	150	729	1666
Soma	5475	802	15505	27824
Contagem (N)	220	220	220	220
Nível de confiança (95%)	3,4	1,3	11	28
8.Md (máxima relevância)	123	-	276	388
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	217	-	213	201
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	3	-	7	19

Fonte: Os autores (2023).

### 3.1.6 ENFOQUE LOCAL – SERRA DO RABO-ESTRELA

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra do Rabo-Estrela, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 7. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra do Rabo-Estrela) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 7 cavernas (N), não foram encontradas cavernas classificadas como de máxima relevância, no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra do Rabo-Estrela) como igual a 156m<sup>3</sup> para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

### 3.1.7 ENFOQUE LOCAL – SERRA DO TARZAN

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra do Tarzan, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 8. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra do Tarzan) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 60 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância (N > 8.Md = 6 cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra do Tarzan) como igual a 404m<sup>3</sup> para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada. Como o desnível é um parâmetro que não define cavernas de máxima relevância, conforme a legislação vigente, ele não é apresentado ao final da tabela.

Tabela 7 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra do Rabo-Estrela.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	11	1,6	20	39
Erro padrão	1,7	0,6	4,1	19
Mediana	10,1	0,8	16	19
Modo	#N/D	0,8	#N/D	#N/D
Desvio padrão	4,7	1,7	11	52
Variância da amostra	22	2,9	122	2740
Curtose	1,5	-0,6	-1,02	4,7
Assimetria	1,2	1,2	0,7	2,1
Intervalo	14	4,2	28	147
Mínimo	6	0,2	9,6	4,1
Máximo	20	4,4	38	152
Soma	77	11	144	277
Contagem (N)	7	7	7	7
Nível de confiança (95%)	4,3	1,5	10,2	48
8.Md (máxima relevância)	80	-	130	156
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	7	-	7	7
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	0	-	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 8 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local - Serra do Tarzan.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	21	3,6	77	138
Erro padrão	2,6	0,4	14	37
Mediana	12	2,3	41	50
Modo	11	1,1	#N/D	25
Desvio padrão	20	3,2	115	291
Variância da amostra	426	10,6	13400	84737
Curtose	4,6	8,7	12	25
Assimetria	2,1	2,4	3,2	4,5
Intervalo	98	19	659	1930
Mínimo	5,5	0,5	2,8	3
Máximo	103	19	661	1933
Soma	1266	216	4621	8325
Contagem (N)	60	60	60	60
Nível de confiança (95%)	5,3	0,8	29	75
8.Md (máxima relevância)	102	-	334	404
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	59	-	57	54
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	1	-	3	6

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 3.2 Cálculo do Volume pelo Levantamento Convencional x Varredura a Laser

Com base nos resultados da estatística descritiva podemos constatar que o parâmetro espeleométrico volume é o mais importante para definição de cavernas com grau de relevância máximo (N > 8.Md) na amostra de cavidades em análise, levando em consideração apenas os aspectos de dimensões notáveis. Isso é verificado diretamente nos resultados estatísticos que mostraram uma maior quantidade de cavernas classificadas como de máxima relevância quando levamos em consideração apenas a variável volume, em detrimento das demais.

Dessa forma, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos através do levantamento topográfico convencional e o escaneamento utilizando o laser scanner 3D de uma amostra de 60 cavernas selecionadas aleatoriamente da Província Espeleológica da Serra dos Carajás para fins de cálculo volumétrico, com o intuito de verificar o quão discrepante os resultados do método convencional são em relação à varredura

a laser, que é mais preciso como já relatado na bibliografia.

Logo, a Tabela 9 apresenta os resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume por meio da varredura a laser (Vol\_Laser) e do método convencional (Vol\_Conv), bem como o percentual de diferença do método por escaneamento em relação ao convencional (Dif - Vol\_Laser/Vol\_Conv) por meio da razão entre os resultados obtidos da variável volume, conforme mostrado na Eq. (4). Sendo possível verificar dessa forma se os valores obtidos através do escaneamento são maiores (valores positivos) ou menores (valores negativos) do que os previamente calculados por meio do levantamento convencional.

$$Dif = \left( \frac{Vol_{Laser}}{Vol_{Conv}} * 100 \right) - 100 \tag{4}$$

Onde:

Dif é a diferença de volume calculado pelo escaneamento a laser em relação ao método convencional, em escala percentual

Vol\_Laser são os resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume por meio da varredura a laser

Vol\_Conv são os resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume por meio do método convencional

Tabela 9 - Resultados do cálculo de volume das cavernas por varredura a laser (Vol\_Laser) e método convencional (Vol\_Conv).

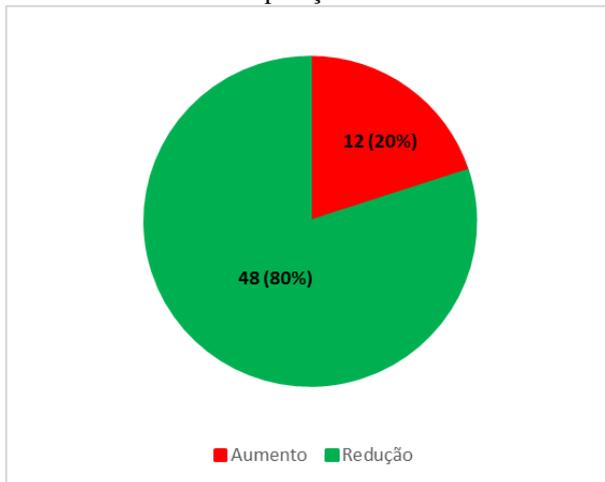
Caverna	Vol_Laser (m³)	Vol_Conv (m³)	Dif - Vol_Laser/Vol_Conv (%)	Caverna	Vol_Laser (m³)	Vol_Conv (m³)	Dif - Vol_Laser/Vol_Conv (%)
Caverna 01	82,3	72	14,3	Caverna 31	2072,1	2995	-30,8
Caverna 02	8,1	7	15,7	Caverna 32	1176,4	1706	-31
Caverna 03	206,9	179	15,5	Caverna 33	59,4	88	-32,5
Caverna 04	238,2	87,5	172,2	Caverna 34	949,3	1496	-36,5
Caverna 05	2501,6	2050	22	Caverna 35	67,3	107,5	-37,3
Caverna 06	169,6	139	22	Caverna 36	450,8	730	-38,2
Caverna 07	410,4	330	24,3	Caverna 37	5	8,8	-43,1
Caverna 08	40,3	31,8	26,7	Caverna 38	4	7	-42,8
Caverna 09	72,3	55	31,4	Caverna 39	324,9	580	-43,9
Caverna 10	8,1	7,5	8	Caverna 40	50,9	93	-45,2
Caverna 11	5,5	5	10	Caverna 41	1297,5	1373,1	-5,5
Caverna 12	38,7	20	93,5	Caverna 42	236,4	510	-53,6
Caverna 13	48,6	70	-30,5	Caverna 43	7,7	16,5	-53,3
Caverna 14	402,1	555	-27,5	Caverna 44	847,6	2044	-58,5
Caverna 15	2183,9	2184,5	-0,02	Caverna 45	51,6	55	-6,1
Caverna 16	319,7	325	-1,6	Caverna 46	162,5	418	-61,1
Caverna 17	542,5	552,9	-1,8	Caverna 47	6,2	19	-67,3
Caverna 18	68,1	76	-10,3	Caverna 48	4,6	15	-69,3
Caverna 19	986	1104,9	-10,7	Caverna 49	141	152	-7,2
Caverna 20	1557,5	1779	-12,4	Caverna 50	31,7	35	-9,4
Caverna 21	876,4	1004	-12,7	Caverna 51	67,3	90	-25,2
Caverna 22	19,1	22	-13,1	Caverna 52	50,7	70,5	-28
Caverna 23	861	1007	-14,4	Caverna 53	975,7	1375	-29
Caverna 24	212,8	250,3	-14,9	Caverna 54	31	44,1	-29,7
Caverna 25	69,6	82	-15,1	Caverna 55	80,8	108	-25,1
Caverna 26	12,6	15	-16	Caverna 56	483,5	624,5	-22,5
Caverna 27	10,9	13	-16,1	Caverna 57	54	70	-22,8
Caverna 28	28,6	35,2	-18,7	Caverna 58	433,4	565	-23,2
Caverna 29	1269,6	1617	-21,4	Caverna 59	11,8	15,5	-23,8
Caverna 30	28	36	-22,2	Caverna 60	16,9	22,6	-25,2

Fonte: Os autores (2023).

Logo, é possível constatar que na maior parte das cavernas estudadas (80%) o valor obtido do volume levantado via mapeamento topográfico convencional é maior do que o obtido via varredura a laser. Com base

no banco de dados analisado, 48 cavidades tiveram a redução no valor total do volume quando obtido via laser scanner em comparação ao levantamento tradicional. Por outro lado, 12 cavernas tiveram um aumento no valor do seu volume (Figura 5).

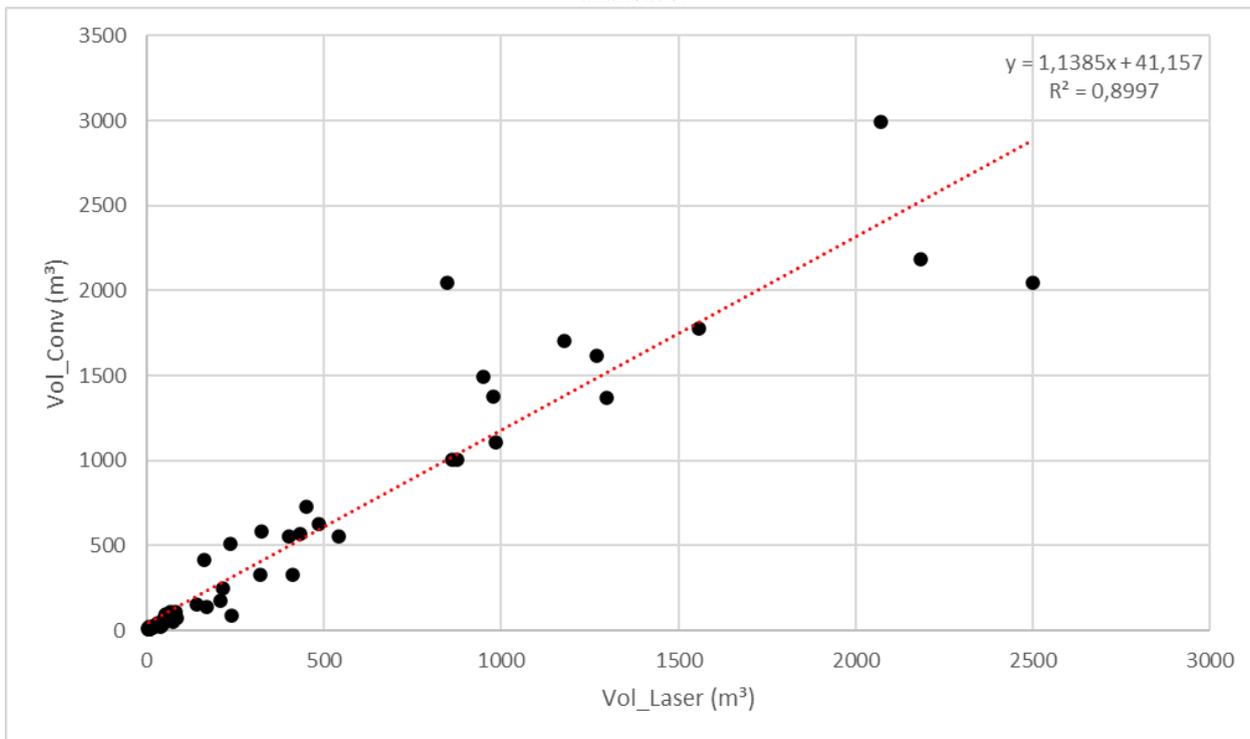
Figura 5 - Gráfico mostrando a quantidade de cavernas que tiveram aumento ou redução no valor do volume calculado via varredura a laser em comparação com o método convencional.



Fonte: Os autores (2023).

Com relação a comparação entre os resultados obtidos no cálculo de volume a partir do Vol\_Laser e do Vol\_Conv, podemos verificar que cerca de 89% do modelo explica a variabilidade dos dados do volume calculado via varredura a laser, conforme obtido pelo resultado do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Figura 6). Dessa forma, podemos verificar que houve uma alta correlação entre os dois métodos de levantamento topográfico aplicados ao cálculo de volume, além de um bom ajuste do modelo linear em relação ao conjunto de observações.

Figura 6 - Gráfico de correlação entre a variável volume calculada via método convencional (Vol\_Conv) e com base na varredura a laser (Vol\_Laser). A linha vermelha representa a reta de regressão linear obtida com base no banco de dados analisado.

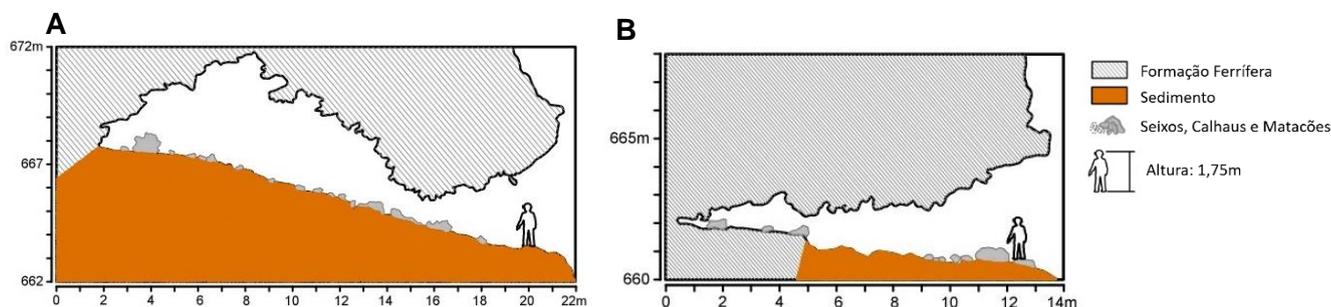


Fonte: Os autores (2023).

As variações observadas entre as medidas obtidas por meio do método convencional e da varredura a laser podem ocorrer por vários fatores, dentre eles os principais são:

- a) A distorção dessas medidas se torna aparente quando comparamos cavernas com piso predominante plano com aquelas que apresentam inclinação (desnível) (Figura 7). Uma vez que as áreas são sempre calculadas a partir de uma projeção horizontal da planta da cavidade, os valores se depreciam ao serem comparados com cavernas que se desenvolvem em planos inclinados. Conseqüentemente, essa mesma distorção afeta a precisão na determinação do volume. Portanto, a acurácia no cálculo do volume pelo método convencional é influenciada não apenas pela quantidade de seções transversais consideradas, mas também pelo grau de inclinação das galerias. Em tais situações, o único modelo capaz de corrigir essas disparidades é a varredura a laser. Dessa forma, as nuvens de pontos geradas das cavernas, combinadas com programas especializados para o processamento dos dados obtidos em campo, possibilitam cálculos precisos das áreas e dos volumes;
- b) Caso existam pilares e locais não acessíveis aos seres humanos dentro das cavernas, com valores de volume obtidos nos dois métodos de levantamento topográfico descritos ao longo deste trabalho, torna-se necessária a subtração desses volumes calculados no volume total da cavidade. Caso essa subtração não seja feita para toda a extensão da cavidade de forma regular ou os volumes dos pilares e dos locais não acessíveis sejam calculados de forma imprecisa, isso pode acarretar erros significativos no cálculo do volume;
- c) Como existe um erro embutido no cálculo da área da projeção horizontal e da altura das seções pelo levantamento topográfico convencional, logo esses erros também se refletem no cálculo para obtermos a variável volume que depende diretamente do valor de PH e da altura média das seções. Dessa forma, a precisão do valor obtido do volume das cavernas pelo levantamento convencional é diretamente proporcional a quantidade e a distância entre as seções verticais.

Figura 7 - Seção longitudinal de caverna com piso inclinado (desnível de 4m) (A); seção longitudinal de caverna com piso predominante plano (desnível de 1m) (B).



Fonte: Os autores (2023).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo de caso realizado nas cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás é perceptível que a varredura a laser de forma geral obteve cálculos de volume com valores menores para cavernas ferríferas do que o método convencional de levantamento topográfico. Além disso, para a validação e aprimoramento da técnica de varredura a laser é necessário que essa mesma metodologia de trabalho seja aplicada em outras províncias espeleológicas, preferencialmente em cavidades compostas por outros litotipos não ferruginosos e com dimensões diversas.

Vale destacar que o método de varredura a laser utilizado no presente estudo, para obtenção do volume de cavernas ferríferas, trouxe maior rapidez (de horas a dezenas de horas para minutos ou poucas horas) na coleta de dados em campo, permitindo uma redução da exposição ao risco dos técnicos em campo, além de ser possível gerar um mapeamento com maior acurácia espeleométrica, sensivelmente superior ao método topográfico convencional.

A aplicação da varredura a laser tem sido difundida por várias áreas das geociências e a evolução dos dispositivos caminha no sentido de se tornarem cada vez mais compactos e acessíveis em termos de preço. Isso indica que essa tecnologia está posicionada para ser a abordagem mais vantajosa para o mapeamento e o

cálculo desse atributo espeleométrico no processo de licenciamento ambiental.

Para futuros estudos sugere-se que seja utilizada a varredura a laser em cavernas inseridas em ambientes geológicos diferentes dos litotipos ferruginosos, com o intuito de analisar e comparar com o método convencional, em especial em cavidades naturais subterrâneas de grandes dimensões (ex: acima de 3000m<sup>3</sup>).

## Agradecimentos

À empresa Vale S.A. pela disponibilização de dados, suporte técnico, além do 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.

## Contribuição dos Autores

O presente trabalho foi elaborado com a contribuição de todos os autores. A.B.F. e G.S.B.: levantamento bibliográfico, materiais e métodos, contexto histórico, comparação entre o método de levantamento topográfico convencional e via varredura a laser, além da escrita do artigo; R.P.B.: revisão, validação e análise crítica do artigo; I.V.B.: disponibilização de material bibliográfico e dados das cavidades analisadas, validação e revisão do artigo; R.N.A.: disponibilização de material bibliográfico, levantamento espeleotopográfico via varredura a laser, validação e revisão do artigo; B.S.S.: disponibilização de material bibliográfico, levantamento espeleotopográfico convencional, validação e revisão do artigo; J.A.M.: disponibilização de material bibliográfico, análise sobre a comparação entre o método de levantamento topográfico convencional e via varredura a laser, validação e revisão do artigo. Vale destacar que todos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## Referências

- 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. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe\\_321-327.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf)>. Acesso em: 27 ago. 2023.
- BERBERT-BORN, M. Instrução Normativa MMA 2/09 - Método de classificação do grau relevância de cavernas aplicado ao licenciamento ambiental: uma prática possível?. **Espeleo-Tema**, Campinas, v.21, n.1, p.67-103, 2010.
- BOARDMAN, C.; BRYAN, P. **3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture**. 3 ed. Swindon: Historic England, 2018. Disponível em: <<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/>>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- BRAGA, A. A. J; FIORI, A. P.; GONÇALVES, D. F.; COSTA, F. R. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 25, n. 1, p. 24-39, 2017. DOI. 10.18285/geonomos.v25i1.910
- BRASIL. Decreto Federal nº 10.935 de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 jan. 2022.
- CALUX, A.; CRUZ, J.; ARAÚJO, R.; LOTT, F.; BRANDI, I. O cálculo do volume de cavernas no contexto do licenciamento ambiental: estudo comparativo. In: SIMPÓSIO MINEIRO DO CARSTE, 3, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2017. p. 47. Disponível em:

- <[https://drive.google.com/file/d/1ZJmYQN7N\\_A6Jw\\_mxUez60G5n1YxVUdsp/view](https://drive.google.com/file/d/1ZJmYQN7N_A6Jw_mxUez60G5n1YxVUdsp/view)>. Acesso em: 02 jul. 2023.
- FERNANDES, A. B.; BORBA, R. P.; BRANDI, I. V.; ARAÚJO, R. N.; SCHERER, B. S.; CORRÊA, T. R.; BOULHOSA, G. S. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.24, n.3, p. 1-15, 2023. DOI. 10.20502/rbg.v24i3.2315
- FERREIRA, G. L. B. A classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas como mecanismo de compatibilização. **Prisma Jurídico**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 123-149, 2017. DOI. 10.5585/prismaj.v16n1.7317
- GALDEANO, M. G.; MUNIZ, F. G.; PETTERSEN, 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.
- 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**, Tampa, v. 44, n.3, p. 277-291, 2015. DOI. 10.5038/1827-806X.44.3.6
- GEOSLAM. ZEB REVO RT – Scan, process and track your process as you go. Nottingham: Geoslam, 2023.
- ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 1 ed. Brasília: ICMBio, 2019. Disponível em: <[https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/espeleologia\\_e\\_licenciamento\\_ambiental.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/espeleologia_e_licenciamento_ambiental.pdf)>. Acesso em: 27 ago. 2023.
- LOBATO, L. ROSIÈRE, C.; FIGUEIREDO E SILVA, R.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.; SEOANE, J. C.; RIOS, F.; PIMENTEL, M.; MENDES, G. E.; MONTEIRO, A. M. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás, controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W (Ed.). **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. Brasília: ADIMB/DNPM, 2005. p. 21-92.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa n° 2 de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5° do Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF: MMA, 2017.
- RUBBIOLI, E.; AULER, A. S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo**. Brasília: ICMBio, 2019.
- 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](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf)>. Acesso em: 02 jul. 2023.
- TECHNODIGIT. **3DReshaper Meteor Beginner's Guide**. 2018.
- TETRA TECH. **Relatório Técnico – Estudos Espeleológicos para Licenciamento Ambiental – Validação Espeleométrica com Scanner 3D**. Belo Horizonte: Tetra Tech, 2018.
- VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021.
- VALE S.A. **Banco de dados Espeleométrico de Cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás**. Parauapebas: Vale S.A., 2023.
- 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: 01 dez. 2023. DOI:10.4311/2012EX0287

## Biografia do autor principal



Adam Barros Fernandes. Nascido em Ipatinga, Minas Gerais. Graduação em Geologia pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Mestrado em Geotecnia pelo Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Especialização em Direito da Mineração pelo Centro de Estudos em Direito e Negócios (CEDIN) e é discente no curso de Doutorado na área de Geologia e Recursos Naturais do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Possui experiência profissional nas áreas de Mineração, Meio Ambiente e Geotecnia. Tendo atuado em empresas de mineração e consultorias.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://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.