

VRB Esp

Revista Brasileira de ESPELEOLOGIA

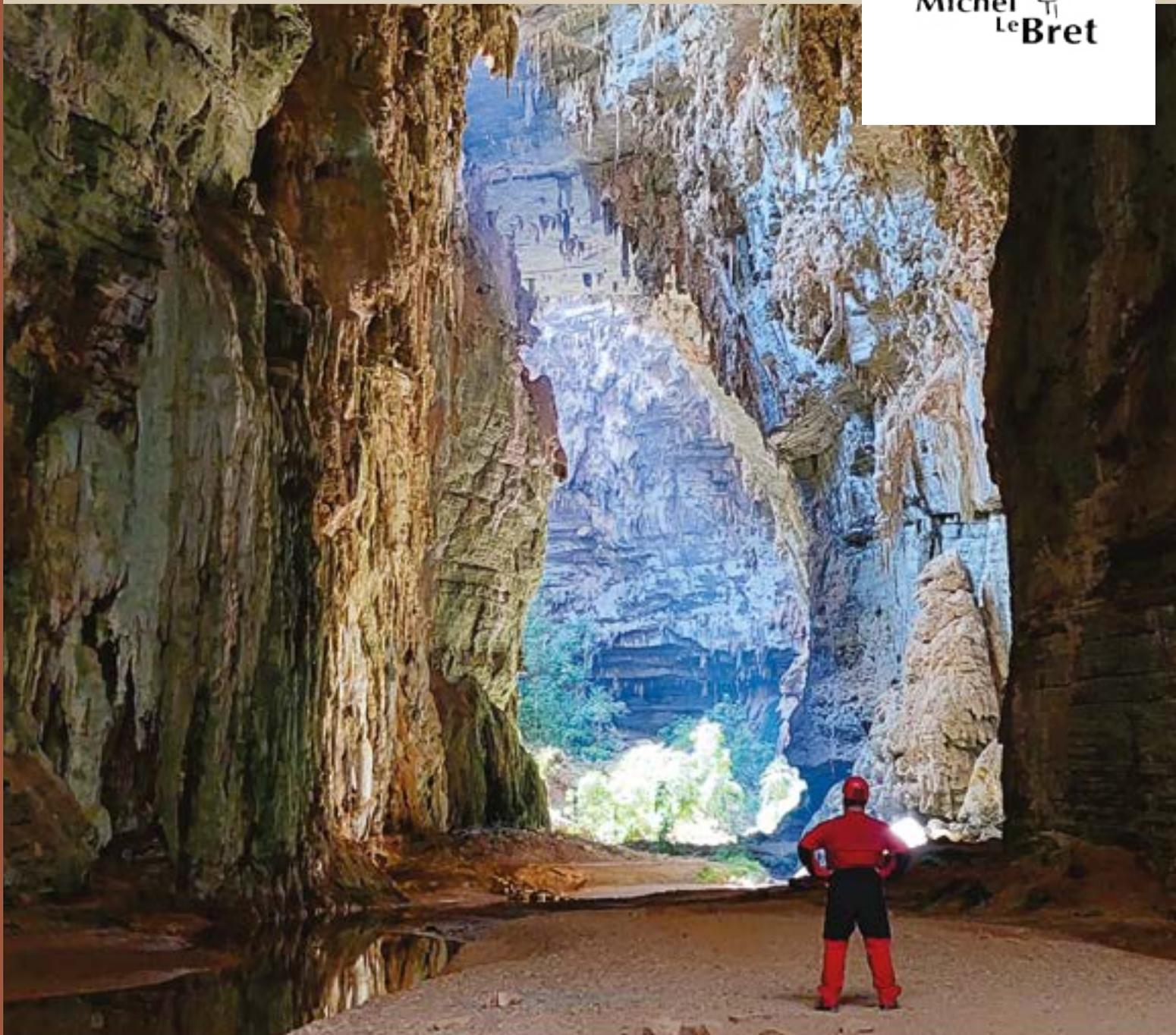
Edição especial Nº 1 de 2022.
ISSN 2179.4952

EDIÇÃO ESPECIAL

1º Prêmio
Nacional
de Espeleologia



Michel
LeBret



Equipe editorial

Júlio Ferreira da Costa Neto, Jocy Brandão Cruz, Julio César Rocha Costa,
Diego de Medeiros Bento, Thais Xavier Nunes e Claudia Simone da Luz Alves.



VRBEsp
Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

Brasília-DF
2022



Expediente edição especial

Publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav www.icmbio.gov.br/cecav

Endereço: Parque Nacional de Brasília. Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia. CEP: 70635-800, Brasília/DF. Brasil.

Telefone: +55 (61) 2028-9792.

Editores

Júlio Ferreira da Costa Neto

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Jocy Brandão Cruz

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Comissão de apoio editorial

Claudia Simone da Luz Alves

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Thais Xavier Nunes

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Diego de Medeiros Bento

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

Julio César Rocha Costa

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

Comissão Científica da edição especial

Dr. Allan Silas Calux

Scientific Director at Carstografica –Karst Applied Research Centre, Campinas, São Paulo, Brasil.

Dr. Enrico Bernard

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

Coordenação editorial

Flávio Silva Ramos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Esa Gomes Magalhães

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Projeto gráfico e diagramação

Bruno Silva Bastos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Julia Mendes

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Foto da capa

Gruta do Janelão, MG / Jocy Cruz

Catlogação na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Revista Brasileira de Espeleologia. Edição Especial – 1º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret / Julio Ferreira da Costa Neto e Jocy Brandão Cruz (ed.) – Brasília: ICMBio, 2022.

ISSN 2179.4952 - Online

122 p. ; Il. Color.

1. Espeleologia. 2. Estudos Ambientais. 3. Geomorfologia cárstica. 4. Biologia subterrânea. I. Julio Ferreira da Costa Neto II. Jocy Brandão Cruz. III. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VI. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav. V. Título.

CDU: 551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida, desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia – Parque Nacional de Brasília

CEP: 70635-800 - Brasília/DF - Tel: 61 2028-9792

<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

Sumário

5 | SOBRE A REVISTA

6 | EDITORIAL

8 | CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA E SEDIMENTAR DE UMA CAVERNA DO MACIÇO QUARTZÍTICO SERRA SÃO JOSÉ, MINAS GERAIS

SPELEOLOGICAL AND SEDIMENTARY CHARACTERIZATION OF A CAVE IN THE SERRA SÃO JOSÉ QUARTZITE MASSIF, MINAS GERAIS

Liliane de Jesus Brandão

40 | ASPECTOS ECOLÓGICOS DE DUAS GRANDES COLÔNIAS DE MORCEGOS NECTARÍVOROS (ANOURA GEOFFROYI GRAY, 1838) RESIDENTES EM CAVERNAS NO BRASIL: IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO

ECOLOGICAL ASPECTS OF TWO LARGE NECTARIVOROUS BAT COLONIES (ANOURA GEOFFROYI GRAY, 1838) RESIDENT IN BRAZILIAN CAVES: IMPLICATIONS FOR CONSERVATION

Aline da Silva Reis

65 | POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE BACTÉRIAS CULTIVÁVEIS OBTIDAS A PARTIR DA GRUTA MARTIMIANO II, PARQUE ESTADUAL DO IBITIPOCA – MG

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF CULTURABLE BACTERIA OBTAINED FROM MARTIMIANO II CAVE, IBITIPOCA STATE PARK - MG

Lara Chaves Carvalho Guerra

90 | AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS NO MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO 3D A PARTIR DE MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS DE CAVIDADES SUBTERRÂNEAS EM MINAS GERAIS, BRASIL

PROCESSES AUTOMATION IN 3D SPELEOLOGICAL MAPPING FROM PHOTOGRAMMETRIC MODELS OF UNDERGROUND CAVITIES IN MINAS GERAIS, BRAZIL.

Paulo Rodrigo Simões





foto: Catharina Maldaner

Sobre a revista

A Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp, INSS 2179.495, abrange a geologia cárstica, hidrologia, geomorfologia, espeleologia, hidrogeologia, bioespeleologia e a história da ciência espeleológica. A revista, de fluxo contínuo, está disponível em acesso aberto no site do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav.

Normas editoriais

Acesse: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/rebe/about>

É com grande satisfação que, no ano do seu 25º aniversário, o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas ICMBio/Cecav disponibiliza à comunidade acadêmico-científica a edição especial da Revista Brasileira de Espeleologia (RB Esp). A RB Esp foi lançada em 2010 como veículo de registro e divulgação científica, com o objetivo de publicar artigos de pesquisa, resenhas originais, cartas, mapas, ensaios e relatórios cobrindo tópicos relacionados ao patrimônio espeleológico e sua geobiodiversidade associada. A revista abrange a geologia cárstica, hidrologia, geomorfologia, espeleologia, hidrogeologia, bioespeleologia e a história da ciência espeleológica.

Este volume traz os artigos vencedores do 1º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret, nas categorias ampla concorrência e pós-graduação. A premiação é uma parceria entre o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) e a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), no intuito de incentivar o desenvolvimento e publicação de pesquisas científicas, inventários e soluções técnicas direcionadas para a conservação dos ecossistemas cavernícolas e espécies associadas, assim como auxiliar no manejo das unidades de conservação federais com essa característica em seu ambiente.

Na RB Esp edição especial você encontrará os seguintes trabalhos:

Categoria ampla concorrência

“Aspectos ecológicos de duas grandes colônias de morcegos nectarívoros (*Anoura geoffroyi* Gray, 1838) residentes em cavernas no Brasil: implicações para conservação”, de Aline da Silva Reis; Robson de Almeida Zampaulo e Sônia A. Talamoni.

Categoria pós-graduação

“Caracterização espeleológica e sedimentar de uma caverna do maciço quartzítico Serra São José, Minas Gerais”, de Liliane de Jesus Brandão, Rafael Costa Cardoso, Roberto Franco, Diego Tassinari, Camila Rodrigues Costa, Alexandre Christófaros Silva e Rodrigo Lopes Ferreira.

“Potencial biotecnológico de bactérias cultiváveis obtidas a partir da gruta Martimiano II Parque Estadual do Ibitipoca – MG”, de Lara Chaves Carvalho Guerra, Camila Gracyelle de Carvalho Lemes e Lendro Marcio Moreira.

“Automação de processos no mapeamento espeleológico 3D a partir de modelos fotogramétricos de cavidades subterrâneas em Minas Gerais, Brasil”, de Paulo Rodrigo Simões.

A premiação que selecionou os artigos da revista ganhou o nome de Michel Le Bret por ele ser um dos grandes nomes da espeleologia. Nascido na França, o espeleólogo desenvolveu, desde a infância, habilidades com o desenho e a carpintaria, o que na vida adulta o tornou um excelente croquista e lhe permitiu desenvolver os primeiros equipamentos de mergulho em cavernas durante meados do século XX, além de outros acessórios que auxiliaram no avanço das técnicas de exploração vertical. Foi responsável pelos avanços na exploração e mapeamento, técnicas verticais e mergulho em cavernas. No Brasil, é um dos fundadores da primeira Sociedade Brasileira de Espeleologia, e entre suas inúmeras contribuições, atuou na criação de bases para estruturar de maneira sistemática a ciência no país, incentivando o estudo e a pesquisa do patrimônio espeleológico brasileiro.

Agradecemos a colaboração dos participantes do 1º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret, dos autores dos artigos selecionados e, também, dos revisores. E convidamos a todos à publicação dos resultados de suas pesquisas quer seja de natureza empírica, experimental ou conceitual; buscando fomentar o intercâmbio de experiência, sempre divulgando e promovendo o fortalecimento da ciência espeleológica nacional.

Parabéns aos premiados e boa leitura!

Editores-Chefe

Jocy Brandão Cruz
Júlio Ferreira da Costa Neto

Editores-Assistente

Júlio César Rocha Costa
Thaís Xavier Nunes
Cláudia Simone da Luz Alves
Diego de Medeiros Bento

CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA E SEDIMENTAR DE UMA CAVERNA DO MACIÇO QUARTZÍTICO SERRA SÃO JOSÉ, MINAS GERAIS

SPELEOLOGICAL AND SEDIMENTARY CHARACTERIZATION OF A CAVE IN THE SERRA SÃO JOSÉ QUARTZITE MASSIF, MINAS GERAIS

Autora

Liliane de Jesus Brandão

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM
e-mail: brandao.liliane@ufvjm.edu.br

Coautores

Rafael Costa Cardoso; Roberto Franco; Diego Tassinari; Camila Rodrigues Costa;
Alexandre Christófaros Silva; Rodrigo Lopes Ferreira

RESUMO

As cavernas são consideradas “armadilhas” naturais de sedimentos e outros materiais externos que normalmente são transportados e depositados em seu interior, podendo ser acumulados em um ambiente relativamente estável por muitos anos, proporcionando condições adequadas para estudos sedimentológicos e paleoambientais. Estudos sobre a estratigrafia e cronologia de sedimentos presentes em cavernas quartzíticas são escassos e podem contribuir para a reconstituição paleoambiental. Este estudo teve como objetivos mapear a Caverna do Galo, situada no reverso do maciço quartzítico Serra São José (MG) e caracterizar física, química e cronologicamente um pacote de sedimentos de seu interior. A caverna foi mapeada e o pacote de sedimentos com 2,5 m de comprimento, 0,47 m de altura e 0,5 m de espessura foi descrito e amostrado in situ, com base em atributos morfológicos (textura e cor de suas camadas). Foram coletadas 17 amostras, caracterizadas por meio de análises granulométrica, geoquímica e do teor de carbono orgânico. Destas, três amostras foram selecionadas, em função da posição no

ABSTRACT

Caves are considered natural traps for sediments and other external materials that are usually transported and deposited inside them. This material can be accumulated in a relatively stable environment for many years, which provides suitable conditions for sedimentological and paleoenvironmental studies. Stratigraphic and chronological studies of sediments present in quartzite caves can contribute to paleoenvironmental reconstitution, yet those are scarce. This study aimed to map the Galo Cave, located in the dip slope of the Serra São José quartzite massif (MG) as well as to characterize the cave sediment, physically, chemically and chronologically. The cave was mapped and the 2.5 m long, 0.47 m high and 0.5 m thick sediment package was described in situ, based on morphological attributes, and then sampled. Seventeen samples were collected and characterized by granulometric, geochemical and organic carbon content analyses. Three of these samples were selected for radiocarbon dating according to their position in the package

pacote (base, centro e topo) e do teor de carbono orgânico, para datações radiocarbônicas. Os resultados foram utilizados na análise de componentes principais para a visualização conjunta das variáveis (resultados das análises laboratoriais) e das observações (camadas amostradas). A Caverna do Galo foi formada pelas águas meteóricas e sua morfologia foi influenciada pelo falhamento NNW/SSE e pela diferença de dureza entre as rochas componentes (quartzito e filito). O pacote de sedimentos foi depositado preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da caverna, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação. A morfologia e as composições granulométricas e químicas dos sedimentos e a idade radiocarbônica variam ao longo do pacote, evidenciando oscilações na intensidade e duração de eventos de precipitação, que podem estar associados a mudanças climáticas holocênicas.

PALAVRAS-CHAVE: pacote de sedimentos, morfologia, granulometria, geoquímica, datações radiocarbônicas, mudanças climáticas holocênicas.

INTRODUÇÃO

As cavernas são consideradas “armadilhas” naturais de sedimentos e outros materiais externos que normalmente são transportados e depositados em seu interior, podendo ser acumulados em um ambiente relativamente estável por muitos anos (Ford & Williams, 2007). Tais ambientes possuem, portanto, condições muitas vezes adequadas para estudos sedimentológicos e paleoambientais (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Os sedimentos em cavernas são normalmente compostos por depósitos clásticos, os quais se caracterizam por serem fragmentos de rochas preexistentes que foram transportadas e redepositadas no ambiente subterrâneo. A maioria das partículas que compõe este tipo de sedimento em cavernas correspondem a grãos detríticos erodidos da paisagem epígea circundante e carregados para ambiente hipógeo, principalmente por ação de riachos e movimentos de massa (Springer, 2019).

Mudanças ambientais e geomorfológicas no entorno das cavernas são responsáveis pela varia-

(base, center and top) and their organic carbon content. The results were used in principal component analysis for the joint visualization of the variables (laboratory analysis results) and observations (sampled layers). Galo Cave was formed by meteoric waters and its morphology was influenced by the NNW/SSE faulting and the hardness difference between the component rocks (quartzite and phyllite). The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling. The morphology, granulometric and chemical compositions of the sediments and the radiocarbon age vary throughout the package, evidencing oscillations in the intensity and duration of precipitation events, which may be associated with Holocene climatic changes.

KEYWORDS: *sediment package, morphology, grain size, geochemistry, radiocarbon dating, Holocene climate change.*

INTRODUCTION

Caves are considered natural traps for sediments and other external materials that are transported and deposited inside, accumulating in a relatively stable environment for many years (Ford & Williams, 2007). Therefore, such environments often have suitable conditions for sedimentological and paleoenvironmental studies (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Cave sediments are usually composed of clastic deposits, which are fragments of pre-existing rocks that were transported and redeposited in the underground environment. Most of the particles that make up this type of sediment in caves correspond to detrital grains eroded from the surrounding epigeic landscape and carried into the hypogeous environment, mainly by the action of streams and mass movements (Springer, 2019).

Environmental and geomorphological changes in the surroundings of the caves are respon-

bilidade das características de seus depósitos sedimentares (Bosch & White, 2007), bem como pela arquitetura estratigráfica de seu preenchimento, os quais também são influenciados pelas características físicas de cada caverna (Šušteršič et al., 2009). Os processos de intemperismo e a quantidade de sedimentos fornecidos estão condicionados ao controle climático oriundo das taxas de deposição e da natureza dos sedimentos. Dessa maneira, qualquer mudança climática é capaz de alterar o fluxo sedimentar, com diminuição ou aumento da quantidade e da granulometria do material disponível para o transporte e sedimentação (Farrant & Smart, 2011). Além disso, sedimentos podem também ser removidos do interior das cavernas por meio de diferentes processos, o que faz com que certas cavernas tenham uma intrincada e complexa história deposicional (Auler et al., 2009; O'Connor et al., 2017). Portanto, os sedimentos clásticos das cavernas são fundamentais para entender os processos que moldam as cavernas e paisagens, podendo fornecer informações importantes a respeito de mudanças paleoambientais, além de registros paleontológicos e arqueológicos.

A maior parte das informações existentes sobre sedimentologia de cavernas refere-se a cavernas carbonáticas (especialmente calcários e dolomitos), de modo que a literatura referente à sedimentologia de cavernas não-carbonáticas é muito escassa (Butzer, 1973; Schulz et al., 2002). Para cavernas quartzíticas, estudos tendem a focar mais em processos espeleogenéticos (Fabri et al., 2015, Sauro et al. 2014; Auler & Sauro, 2019), de modo que a sedimentologia acaba sendo muitas vezes negligenciada. A exemplo disso, a maior parte dos estudos sobre sedimentos em cavernas siliciclásticas foi realizada como parte de estudos arqueológicos (Butzer, 1973; Brook et al., 2011; Tribolo et al., 2016).

Tendo em vista a escassez de estudos sobre a sedimentologia em cavernas quartzíticas e da consequente importância de informações sobre estratigrafia e cronologia de sedimentos presentes neste tipo de caverna, este estudo teve como objetivos mapear a Caverna do Galo, situada no reverso da Serra São José (MG), caracterizar um pacote de sedimentos de seu interior por meio de análises granulométrica, geoquímica e do teor de carbono orgânico de suas camadas e identificar a cronologia da deposição por meio de datações radiocarbônicas.

sible for the variability of their sedimentary deposits (Bösch & White, 2007). Furthermore, they also affect the stratigraphic architecture of their filling, which is also influenced by the physical characteristics of each cave (Šušteršič et al., 2009). The weathering process and the amount of sediments supplied are conditioned to climatic controls, which affect the deposition rates and the nature of the sediments. Therefore, climatic changes are capable of altering sediment fluxes, decreasing or increasing the amount and grain size of the material available for transport and sedimentation (Farrant & Smart, 2011). In addition, sediments can also be removed from the cave interior through different processes, which results in certain caves having an intricate and complex depositional history (Auler et al., 2009; O'Connor et al., 2017). Consequently, clastic cave sediments are critical to understanding the processes that shape caves and landscapes, and can provide important information regarding paleoenvironmental changes, as well as paleontological and archaeological records.

Existing information on cave sedimentology refers mostly to carbonate caves (especially limestones and dolomites), thus literature concerning non-carbonate caves sedimentology is very scarce (Butzer, 1973; Schulz et al., 2002). Quartzitic caves studies tend to focus on speleogenetic processes (Fabri et al., 2015, Sauro et al. 2014; Auler & Sauro, 2019), with sedimentology often being neglected. For example, most siliciclastic caves sediments studies have been conducted as part of archaeological studies (Butzer, 1973; Brook et al., 2011; Tribolo et al., 2016).

Taking into account the scarcity of sedimentology studies in quartzite caves and the consequent importance of information on stratigraphy and chronology of the sediments present in this type of cave, this study aimed to map Galo Cave, situated in the dip slope of Serra São José (MG), to characterize a package of sediments from its interior by means of granulometric, geochemical and organic carbon content analyses of its layers. In addition to identifying the chronology of the deposition by means of radiocarbon dating.

ÁREA DO ESTUDO

A Serra São José se situa no centro-sul do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas de 21° 03' e 21° 07' de latitude sul e de 44° 06' e 44° 14' de longitude oeste, com altitudes variando de 1.000 a 1.430 m. Possui 13 km de extensão, na direção SW/NE e em média 1,2 km de largura, abrangendo terras dos municípios de Prados, São João Del Rei, Tiradentes, Santa Cruz de Minas e Coronel Xavier Chaves (Figura 1). Passou a compor a Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra de São José em 16 de fevereiro de 1990, pelo Decreto Estadual nº 30.934.

Está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes, pertencente ao curso superior do Rio Grande, um dos formadores do Rio Paraná e que se destaca nacionalmente pela geração de energia elétrica. Na área da APA, existem importantes locais de recarga hídrica, cabeceiras de diversos cursos d'água de pequeno e médio porte, dentre os quais se pode citar os córregos Santo Antônio, Caracol, Areias, Mangue e Pedras (FABRANDT, 2000).

Esta serra é formada por um maciço quartzítico que se ergue a uma altitude máxima de 1.430 m, destacando-se da paisagem circundante, onde predominam altitudes de cerca de 900 m. Em uma região de seu reverso, conhecida como 'Serra Nova', desenvolve-se um sistema de cavernamentos em quartzito, no qual se tem observado um grande potencial espeleológico, com destaque para as cavernas Lapa do Jair, Caverna do Canhão e a Caverna do Galo, sendo que esta última abriga um destacado pacote sedimentar. Estas cavernas são epigênicas, ou seja, formadas pelas águas meteóricas que, com o tempo, adquirem a capacidade de dissolver a rocha e formar cavidades "de cima para baixo" (Travassos, 2019).

A Caverna do Galo, local deste estudo, se situa no reverso e tem sua entrada principal nas coordenadas 21° 03' 36,40" sul e 44° 07' 08,49" oeste, onde a altitude é de 1315 m (Figura 1).

STUDY AREA

Serra São José is located in the center-south of Minas Gerais state, between geographical coordinates 21° 03' and 21° 07' South and 44° 06' and 44° 14' West, with altitudes ranging from 1,000 to 1,430 m. It is 13 km long, in the SW/NE direction and on average 1.2 km wide. It covers land in the municipalities of Prados, São João Del Rei, Tiradentes, Santa Cruz de Minas and Coronel Xavier Chaves (Figure 1). It became part of the Environmental Protection Area (Área de Proteção Ambiental - APA) of Serra de São José on February 16, 1990, by State Decree nº 30,934.

It is inserted in the Hydrographic Basin of the Mortes River, which belongs to the upper course of the Grande River, one of the tributaries of the Paraná River, which is nationally known for its generation of electric energy. In the APA there are important places of hydric recharge, headwaters of several small and medium water courses, among which we can mention the Santo Antônio, Caracol, Areias, Mangue and Pedras streams (FABRANDT, 2000).

This mountain range is formed by a quartzite massif that rises to a maximum altitude of 1,430 m, surrounded by land where 900 m altitudes predominate. In a region of its dip slope, known as 'Serra Nova', there is a system of quartzite caves with great speleological potential, especially the Lapa do Jair, Caverna do Canhão and Galo caves, the latter of which shelters an outstanding sedimentary package. These caves are epigenetic, i.e., formed by meteoric waters that, over time, acquire the ability to dissolve the rock and form "top-down" cavities (Travassos, 2019).

Galo Cave, is located on the dip slope side and has its main entrance at coordinates 21° 03' 36.40" south and 44° 07' 08.49" west, at 1315 m altitude (Figure 1).

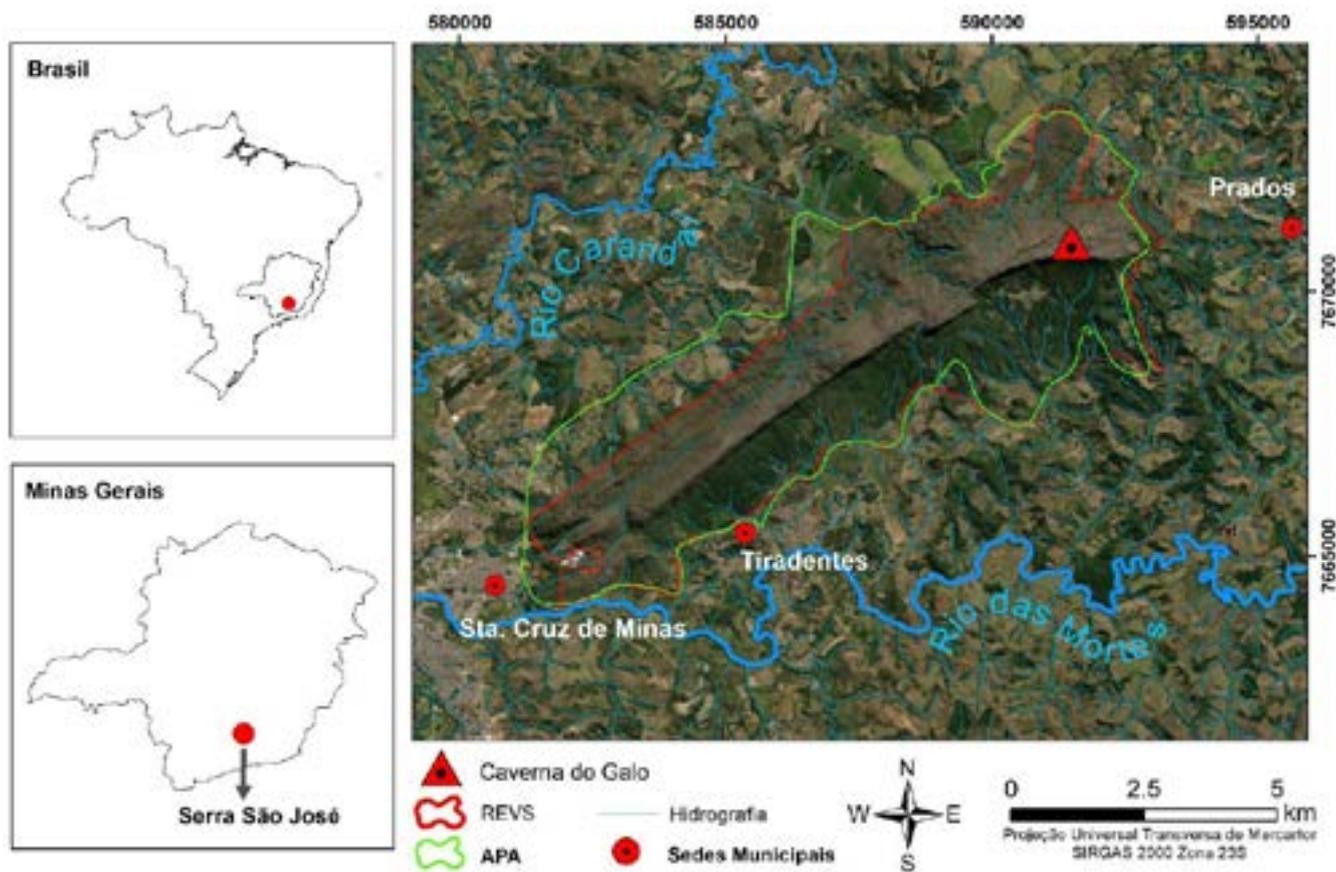


Figura 1 – Localização da Caverna do Galo, na Serra São José (MG).

Figure 1 – Galo Cave Location at Serra São José (MG).

O arcabouço geológico que mantém a paisagem na região da Serra São José faz parte de uma discordância regional que separa duas grandes unidades geoambientais: i) o embasamento arqueano-paleoproterozóico do Sul do Cráton São Francisco, e ii) sucessões metassedimentares proterozóicas incluída a Megassequência São João del Rei (COMIG, 2003), a qual compreende a Sequência Tiradentes (Psjr1), onde desenvolve o complexo de cavidades da Serra Nova, a área de estudo (Figura 2).

The geological framework that maintains the landscape in the Serra São José region is part of a regional discordance that separates two large geological units: i) the Archean-Paleoproterozoic basement of the southern São Francisco craton, and ii) Proterozoic Metasedimentary Sequences including the São João Del Rei mega-sequence (COMIG, 2003). This one comprises the Tiradentes sequence (Psjr1), where the Serra Nova cavity complex develops (Figure 2).

As estruturas geológicas que delimitam e criam as unidades paisagísticas da Serra São José são conformadas por um eixo de falha preferencial sentido SW/NE (Figura 2) associada à deformação Brasileira (COMIG, 2003). A linha de falha preferencial SW/NE é cortada por falhas subverticais e fraturas preferenciais em sentido SSE/NNW, onde desenvolve um sistema acentuado de dissecação, com formação de drenagens de vários portes, acanalados, grandes fendas e cavidades (Figura 3).

The geological structures that delimit and create the landscape units of Serra São José are conformed by a SW/NE preferential fault axis (Figure 2) associated with the Brasiliano deformation (COMIG, 2003). The SW/NE preferential fault line is cut by subvertical faults and preferential fractures in SSE/NNW direction. Along these structures, develops an accentuated system of dissection, with formation of drainages of various sizes, channeled, large cracks and cavities (Figure 3).

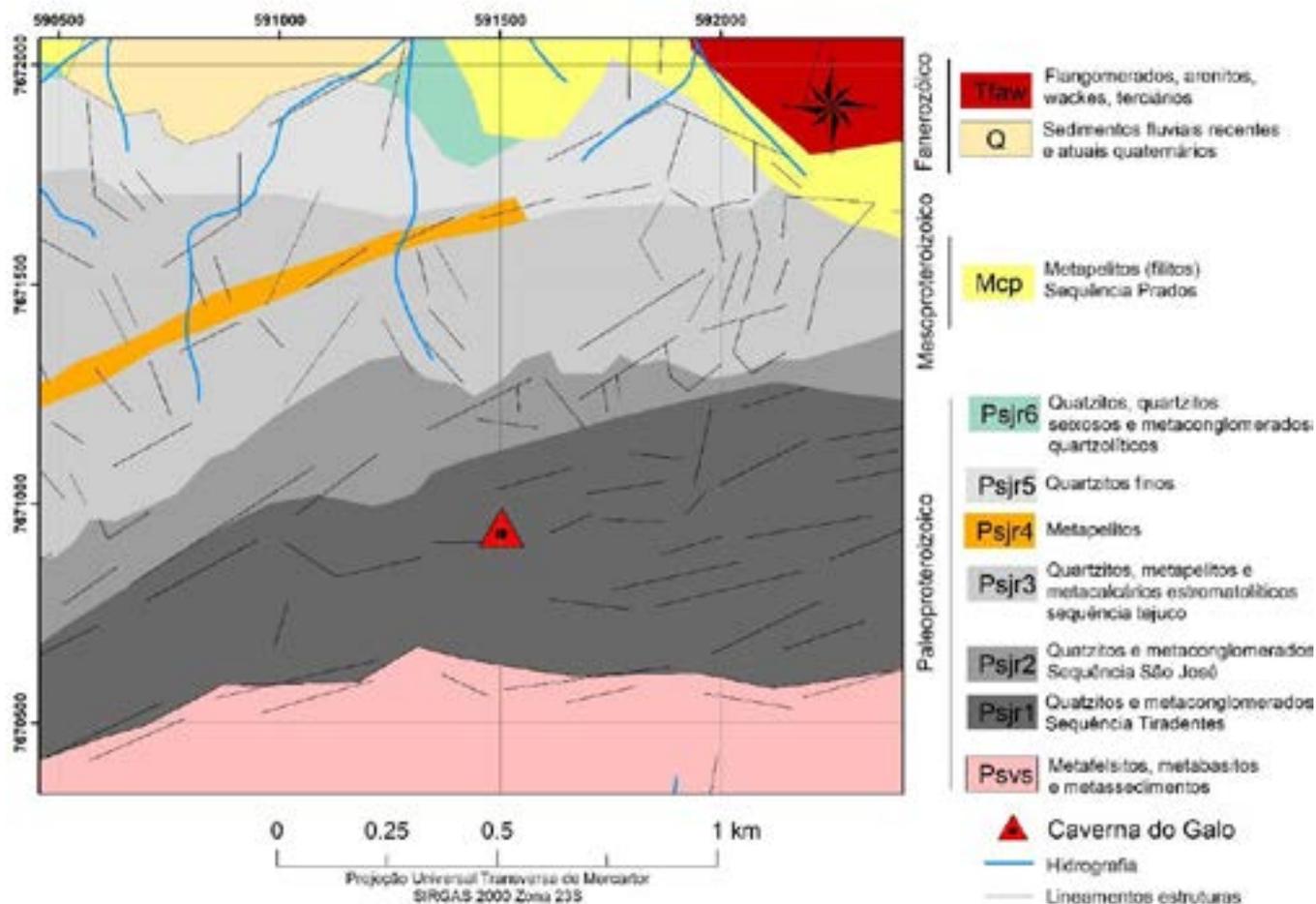


Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo.

Figure 2 – Geological map of the study area.



Figura 3 – (A) Escarpa de linha de falha, face sul da Serra São José, visada NE/SW. (B) Drenagem desenvolvida sobre falhamento SSE/NNE, no reverso da face norte da Serra São José.

Figure 3 – (A) Fault line scarp, south face of Serra São José, view NE/SW. (B) Drainage developed on SSE/NNE fault, on the dip slope of the north face of Serra São José.

A escarpa e o reverso desta elevação quartzítica teriam surgido pela ação da tectônica ressurgente, que formou um graben no contato entre a Megassequência São João del Rei e os metapelitos e filitos da Formação Prados, no limite leste/nordeste da serra (Saadi *et al.*, 1991).

The escarpment and the dip slope of this quartzite elevation would have arisen due to the action of the resurgent tectonics, which formed a graben at the contact between the São João del Rei Megasequence and the metapelites and phyllites of the Prados Formation, at the east/northeast limit of the mountain range (Saadi *et al.*, 1991).

Os solos predominantes, os Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, foram formados, em sua maioria, a partir de um único material de origem, quartzitos com resistências variáveis ao intemperismo (COMIG, 2003). São solos arenosos, que apresentam matéria orgânica lentamente humificada, dada à resiliência da vegetação local. Estes solos constituem a fonte dos sedimentos que circulam no interior das cavernas, juntamente com os produtos da dissolução dos quartzitos.

A vegetação da Serra São José pertence ao bioma Cerrado e as fitofisionomias predominantes são o Campo Rupestre e o Cerrado Rupestre, cujas espécies são a fonte de matéria orgânica encontrada nos sedimentos. Abaixo da escarpa, fora do maciço quartzítico, predominam espécies do bioma Mata Atlântica. A vegetação a montante da entrada principal da Caverna do Galo apresenta indivíduos arbóreos de médio porte, com epífitas em abundância, pertencentes a espécies típicas de matas de galeria do bioma Cerrado (Figura 4).

The predominant soils, Litholic Neosols and Quartz Neosols, were formed mostly from a single source material, quartzite with variable resistance to weathering (COMIG, 2003). These are sandy soils, which present organic matter slowly humified, given the resilience of the local vegetation. Along with the products of the dissolution of the quartzite, these soils are the source of the sediments that circulate inside the caves.

The vegetation of Serra São José belongs to the Cerrado Biome and the predominant phytophysionomies are Campo Rupestre and Cerrado Rupestre, whose species are the source of organic matter found in the sediments. Below the escarpment, outside the quartzite massif, Atlantic Forest Biome species predominate. The upstream vegetation from Galo Cave main entrance presents medium-sized arboreal individuals, with abundant epiphytes, of typical gallery forests species of the Cerrado Biome (Figure 4).



Figura 4 - Entrada principal da Caverna do Galo. Ao fundo, a vegetação arbórea, a montante da entrada. No primeiro plano, a forma prismática da entrada principal: cruzamento entre pontos de fraqueza horizontal em acamamento (traço vermelho), e vertical em fraturamento (traço amarelo).

Figure 4 - Galo cave main entrance. In the background the arboreal vegetation, upstream of the entrance. In the foreground, the prismatic shape of the main entrance: intersection between horizontal points of weakness in bedding (red trace), and vertical in fracturing (yellow trace)..

METODOLOGIA

Mapeamento da Caverna do Galo

A metodologia de mapeamento consistiu de duas etapas, uma de escritório e a segunda, realizada em campo. A etapa de escritório consistiu no levantamento de dados bibliográficos e confecção de mapas base utilizando-se de imagens de satélite e mapas topográficos, momento em que foram definidas as áreas alvo para a prospecção na região da Serra São José conhecida como “Serra Nova”, onde são encontradas cavidades naturais.

Para a etapa de campo, foi necessário prospectar e explorar as áreas alvo, percorrendo preferencialmente drenagens e zonas de fraturas bem desenvolvidas, exercendo o devido cadastramento, mapeamentos de feições subterrâneas e da geologia estrutural, que conduz este geoambiente.

A Caverna do Galo foi mapeada em escala de 1:250, utilizando-se bússola Brunton e trena laser, seguindo o método de bases fixas (Day, 2002; Rubbioli & Moura, 2005) com grau de precisão BCRA 4C.

Coleta e análise dos sedimentos

O pacote de sedimentos foi descrito dentro da caverna, com base em atributos morfológicos, representados pela textura, composição mineralógica e cor das amostras e amostrado em janeiro de 2020. As 17 amostras coletadas foram secas ao ar e analisadas quanto à granulometria, teor de carbono orgânico, elementos maiores e traços (análise geoquímica).

A análise granulométrica foi realizada para obtenção dos teores de argila + silte e das frações de areia muito grossa, grossa, média, fina e muito fina, conforme metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

A análise geoquímica foi realizada por meio de espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva, do modelo Shimadzu EDX-720. Para a calibração do equipamento, foi utilizado o padrão A-720 de composição conhecida. Foi utilizado suporte de polietileno, tendo ao fundo filme Mylar® de 6 µm

METODOLOGY

Galo Cave Mapping

The mapping methodology consisted of two stages, one in the office and a second one carried out in the field. The office stage consisted of a bibliographic survey and the formulation of base maps using satellite images and topographic maps. Subsequently, the target areas for prospecting were defined in the “Serra Nova” region on Serra São José, where natural cavities are found.

For the field stage, it was necessary to prospect and explore the target areas, going through drainages and well-developed fracture zones, making records, mapping of underground features and structural geology.

The Galo Cave was mapped on a scale of 1:250, using a Brunton compass and laser tape measure, following the fixed bases method (Day, 2002; Rubbioli & Moura, 2005) with precision grade BCRA 4C.

Sediment collection and analysis

The sediment package was described within the cave based on morphological attributes, represented by texture, mineralogical composition and color and then sampled in January 2020. The 17 samples collected were air-dried and analyzed for grain size, organic carbon content, major and trace elements (geochemical analysis).

*Particle size analysis was performed to obtain the clay + silt content and the very coarse, coarse, medium, fine and very fine sand fractions, according to the methodology proposed by Teixeira *et al.* (2017).*

The geochemical analysis was performed using a Shimadzu EDX-720 model energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer. To calibrate the equipment, the A-720 standard of known composition was used. A polyethylene support was used, with a 6 µm thick Mylar® film of known composition at the bottom. This is a

de espessura de composição conhecida. Esta é uma técnica não destrutiva que pode ser aplicada diretamente à amostra sólida, sem exigir nenhum pré-tratamento químico (Guild *et al.*, 2017). Os teores de carbono orgânico (C) foram determinados pelo método Walkley-Black (Defelipo & Ribeiro, 1981) a partir da oxidação da matéria orgânica.

Três das amostras (amostras 14, 9 e 1, coletadas, respectivamente, a 37, 25 e 2 cm da base do pacote), foram selecionadas em função de sua posição no pacote de sedimentos e do conteúdo de carbono orgânico, e posteriormente datadas por ^{14}C . O pré-tratamento das amostras consistiu na remoção manual de fragmentos contaminantes (Pessenda *et al.*, 2009). As amostras foram enviadas ao Laboratório ^{14}C (CENA/USP), onde foram submetidas à combustão na linha de síntese de benzeno para obtenção do CO_2 , o qual foi encapsulado a vácuo e encaminhado para datação pela técnica de Accelerator Mass Spectrometry. Os resultados foram corrigidos para o fracionamento isotópico natural (-25‰) e apresentados em idade ^{14}C convencional em anos antes do presente (AP) e em idade calibrada em anos de calendário, em intervalos com erro de 2σ .

Análises estatísticas

Os teores das frações granulométricas foram analisados empregando-se o pacote G2Sd (Fournier *et al.*, 2014) no software R (R Core Team, 2021). A granulometria foi caracterizada pelo método dos momentos, sendo determinados o diâmetro médio geométrico, o desvio padrão geométrico, o coeficiente de assimetria e a curtose, a partir das distribuições granulométricas obtidas em cada camada.

Os resultados das análises granulométrica, geoquímica e o teor de C obtidos para as camadas amostradas foram empregados na análise de componentes principais para a visualização conjunta das variáveis (resultados das análises laboratoriais) e das observações (camadas amostradas). A análise de componentes principais também foi realizada no software R, empregando-se o pacote factoextra (Kassambara & Mundt, 2020) para construção da representação gráfica do biplot.

As datações radiocarbônicas e as profundidades das respectivas camadas foram utilizadas

*non-destructive technique that can be applied directly to the solid sample without requiring any chemical pretreatment (Guild *et al.*, 2017). Organic carbon (C) contents were determined by the Walkley-Black method (Defelipo & Ribeiro, 1981) from the oxidation of organic matter.*

*Three of the samples (samples 14, 9, and 1, collected at 37, 25, and 2 cm from the base of the package, respectively), were selected based on their position in the sediment package and organic carbon content, and subsequently dated by ^{14}C . Pretreatment of the samples consisted of manual removal of contaminating fragments (Pessenda *et al.*, 2009). The samples were sent to the ^{14}C Laboratory (CENA/USP), where they were combusted in the benzene synthesis line to obtain CO_2 , which was encapsulated in vacuum and forwarded for dating by the Accelerator Mass Spectrometry technique. The results were corrected for natural isotopic fractionation (-25‰) and presented in calibrated ^{14}C age in years before present (cal yr BP) in intervals with 2σ error.*

Statistical Analysis

*Granulometric fractions contents were analyzed by employing the G2Sd package (Fournier *et al.*, 2014) in R software (R Core Team, 2021). The granulometry was characterized by the method of moments, and the geometric mean diameter, geometric standard deviation, asymmetry coefficient, and kurtosis were determined from the granulometric distributions obtained in each layer.*

The granulometric and geochemical analyses results and the C content obtained for the sampled layers were used in the principal components analysis for the joint visualization of the variables (laboratory analysis results) and the observations (sampled layers). The principal components analysis was also performed in R software, employing the factoextra package (Kassambara & Mundt, 2020) to build the graphical representation of the biplot.

The radiocarbon dates and the depths of the respective layers were used to obtain the

para obtenção do modelo idade x profundidade empregando-se o pacote rbacon (Blaauw *et al.*, 2021) no software R. com a curva de calibração SHCal20 (Hogg *et al.*, 2020).

*age x depth model by employing the rbacon package (Blaauw *et al.*, 2021) in R software with the SHCal20 calibration curve (Hogg *et al.*, 2020).*

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTS AND DISCUSSION

A Caverna do Galo e seu desenvolvimento

The Galo Cave and its development

A estrutura geológica delimitadora da Caverna do Galo é conduzida por falhamentos SSE/NNW, condutores do desenvolvimento uma gama de cavernas e abrigos ao longo desta porção do reverso da Serra São José. Os planos estratigráficos preferencialmente mergulham em 30° no sentido NNW, formando uma rampa parcialmente contínua que embasa uma série de canais intermitentes, que por sua vez são agentes de dissolução e abatimento de blocos do maciço quartzítico.

The geological structure delimiting Galo Cave is guided by SSE/NNW faults, which influence the development of a range of caves and shelters along this portion of the dip slope of Serra São José. The stratigraphic planes dip preferentially 30° in the NNW direction, forming a partially continuous ramp. These planes, underlie a series of intermittent channels, which in turn are agents of dissolution and subsidence of blocks of the quartzite massif.

A Caverna do Galo faz parte de um sistema cárstico em rochas siliciclásticas e outras cavidades naturais, que foram identificadas no entorno. Sua entrada principal está localizada em média-alta vertente, desenvolvendo-se na base de um anfiteatro em uma altitude de 1315 metros (Figura 4). Possui 142 m de projeção horizontal e 23 metros de desnível. Seu volume é de 1452 m³ e sua área mapeada é de 538 metros quadrados (Figura 5). Seu desenvolvimento inicial parte do sentido S/N por cerca de 20 metros, até que seu sentido muda para L/O, quando a resistência do acamamento barra o fluxo, mudando a direção no desenvolvimento da caverna.

The Galo cave, alongside other natural cavities identified in the surroundings, is part of a karstic system in siliciclastic rocks. Its main entrance is located on a medium-high slope, developing at the base of an amphitheater at an altitude of 1,315 meters (Figure 4). It has 142 m of horizontal projection and 23 m vertical projection. Its volume is 1,452 m³ and it has a 538 m² mapped area (Figure 5). Its initial development starts from the S/N direction for about 20 meters, until its direction changes to E/W, when the resistance of the bedding obstructs the flow, changing the direction in the development of the cave.

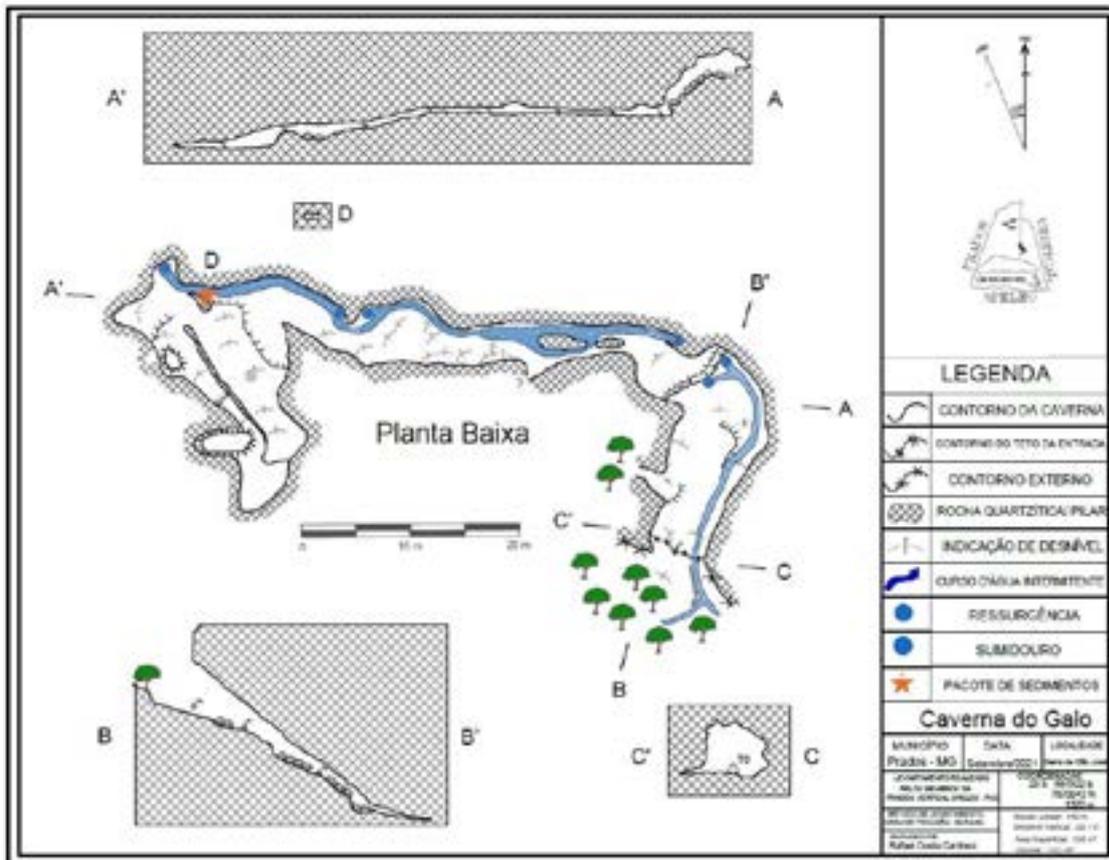


Figura 5 - Mapa da Caverna do Galo.

Figure 5 - Galo Cave Map.

É uma caverna epigênica, formada pelas águas meteóricas que, com o tempo, adquirem a capacidade de dissolver a rocha e formar cavidades “de cima para baixo” (Travassos, 2019). De acordo com Ford & Williams (2007), o quartzito, por ser uma rocha monominerálica, também é capaz de desenvolver feições cársticas apesar da alta resistência do quartzo ao intemperismo e baixa solubilidade da sílica. De acordo com esses autores, essas rochas podem desenvolver feições cársticas quando há presença de planos de acamamento associados a fraturas e quando não há competição com outras formas de erosão (como ciclos de congelamento e degelo), permitindo que a água do escoamento superficial e subsuperficial exerça o trabalho de dissolução da rocha. A drenagem, que desenvolve as feições subterrâneas no interior da caverna, é bem marcada e muito ativa no período chuvoso, com fluxo de água durante cerca de 7 a 9 meses do ano. A Figura 6 apresenta a drenagem ativa no mês de maio de 2015 e o mesmo local com a drenagem inativa, em setembro de 2021.

The cave is epigenetic, formed by meteoric waters that, over time, acquire the ability to dissolve the rock and form “top down” cavities (Travassos, 2019). According to Ford & Williams (2007), despite the high resistance of quartz to weathering and low solubility of silica, quartzite is also capable of developing karst features. According to these authors, these rocks can develop karstic features when there is the presence of bedding planes associated with fractures and when there is no competition with other forms of erosion (such as freeze-thaw cycles), allowing the surface and subsurface water flow to dissolve the rock. The drainage, which develops the underground features inside the cave, is well marked and very active in the rainy season, with water flowing for about 7 to 9 months of the year. Figure 6 shows the active drainage in May 2015 and the same location with the inactive drainage in September 2021.



Figura 6 – Interior da Caverna do Galo. A) Drenagem ativa registrada entre estações topográficas T5 e T6 em maio de 2015 (esquerda); B) Drenagem inativa registrada entre estações topográficas T5 e T6 em setembro de 2021 (direita).



Figure 6 – Galo Cave Interior. A) Active drainage recorded between topographic stations T5 and T6 in May 2015 (left); B) Inactive drainage recorded between topographic stations T5 and T6 in September 2021 (right).

As dinâmicas erosivas e hídricas formam vários abrigos ao longo de toda a Serra São José. No entanto, estas feições são maiores no sistema onde a Caverna do Galo está localizada, em função da intensidade do fluxo das águas superficiais e subterrâneas, aliada à fragilidade geológica atribuída ao falhamento NNW/SSE. Na ampla entrada principal da caverna do Galo, (Figura 4) um grande vazio se projeta em forma prismática, uma característica clássica para formações cársticas, onde a água, aliada a fraturamentos e contatos litológicos distintos (diferença de dureza) possibilita a dissolução da rocha e abertura desses grandes vazios, muitas vezes em locais de quebras de relevo, tal qual o local onde a Caverna do Galo se inicia.

Uma característica observada na entrada da caverna é a presença de lentes centimétricas de filito entre espessos acamamentos de quartzito (Figura 7). Também foi observada mineralização nesse contato, com presença de quartzo e alteração da rocha matriz, quando há essa interação.

A diferença de dureza entre as rochas no acamamento possibilita que a água assuma um comportamento mais destrutivo, ganhando velocidade no material mais duro (quartzito) e erodindo o material mais fraco (filito). Esta característica, aliada a uma fratura vertical, induz a formação de uma entrada ampla com forma prismática, desenvolvendo a partir de onde os planos de fraqueza se cruzam (Figura 4).

The hydric and erosive dynamics form several shelters along the entire Serra São José. However, these features are greater in the system where Galo Cave is located, due to the intensity of surface and groundwater flow, coupled with the geological fragility attributed to the NNW/SSE fault. In the wide main entrance of Galo's Cave (Figure 4) a large void is projected in prismatic form. This is a classic characteristic for karst formations, where water, allied to fractures and distinct lithological contacts (difference in hardness), enables the dissolution of the rock and the opening of these large voids, often in escarpments, such as the place where Galo Cave begins.

A characteristic observed at the cave entrance is the presence of centimetric lenses of phyllite between thick beds of quartzite (Figure 7). Mineralization was also observed in this contact, with the presence of quartz and alteration of the matrix rock.

The difference in hardness between the rocks in the bedding enables the water to assume a more destructive behavior, gaining speed in the harder material (quartzite) and eroding the weaker material (phyllite). This attribute, coupled with vertical fracturing, induces the formation of a wide prismatic shape entrance, developed in the intersection of weakness planes (Figure 4).



Figura 7 – A) Detalhe da parede à direita da entrada da caverna, com acamamento mais espesso composto por quartzito e acamamento mais estreito e erodido remontado à parede composta por filito; B) Detalhe do material siltoso disposto em lentes centimétricas. Materiais com durezas diferentes (quartzo/silte) permitem a erosão remontante da camada siltosa, abrindo caminho para dissolução da caverna.

Caracterização do pacote de sedimentos

Um pacote de sedimentos preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da Caverna do Galo, foi encontrado a 137 m da entrada principal, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação (Figuras 5 e 8). Este pacote, de dimensões correspondentes a 2,5 m de comprimento, 0,47 m de altura (média) e 0,50 m de espessura (média), está bem fixado no local onde foi gradualmente depositado, uma vez que fluxos de água que o deixam submerso não são suficientes para perturbá-lo fisicamente. A Figura 8 apresenta espuma e fragmentos orgânicos no pacote de sedimentos e no teto da caverna, comprovando que o ambiente ficou submerso pouco tempo antes da realização de trabalho de campo (janeiro de 2020). Visitas posteriores (setembro de 2021) comprovaram que o pacote de sedimentos não foi perturbado, permanecendo com a mesma morfologia, podendo, assim, fornecer informações para estudos sedimentológicos e paleoambientais (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).



Figure 7 – A) Detail of the wall to the right of the cave entrance, with thicker quartzite bedding and narrower and eroded bedding composed by phyllite; B) Detail of the silty material arranged in centimetric lenses. Materials with different hardness (quartz/phyllite) allow reassembled erosion of the silty layer, paving the way for dissolution of the cave.

Characterization of the sediment package

The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave 137 m from the main entrance, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling. (Figures 5 and 8). This package, with dimensions corresponding to 2.5 m in length, 0.47 m in height (average) and 0.50 m in thickness (average), is well fixed in the place where it was gradually deposited, since the water flows that leave it submerged are not enough to physically disturb it. Figure 8 shows foam and organic fragments in the sediment package and on the cave ceiling, proving that the environment was submerged shortly before fieldwork was conducted (January 2020). Subsequent visits (September 2021) demonstrated that the sediment package was undisturbed, remaining with the same morphology. Therefore, it can provide information for sedimentological and paleoenvironmental studies (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Caracterização morfológica

O pacote de sedimentos foi subdividido em 17 camadas, em função de sua cor, granulometria, plasticidade e teor de matéria orgânica. A caracterização morfológica das camadas está apresentada na Tabela 1 e na Figura 11. Três camadas (1, 9 e 14), escolhidas em função de seus teores de matéria orgânica e posição no pacote (base, centro e topo), foram datadas por radiocarbono, conforme já mencionado.

Morphological characterization

The sediment package was subdivided into 17 layers, according to their color, granulometry, plasticity, and organic matter content. The morphological characterization of the layers is presented in Table 1 and Figure 8. Three layers (1, 9, and 14), chosen according to their organic matter content and position in the package (base, center, and top), were radiocarbon dated.

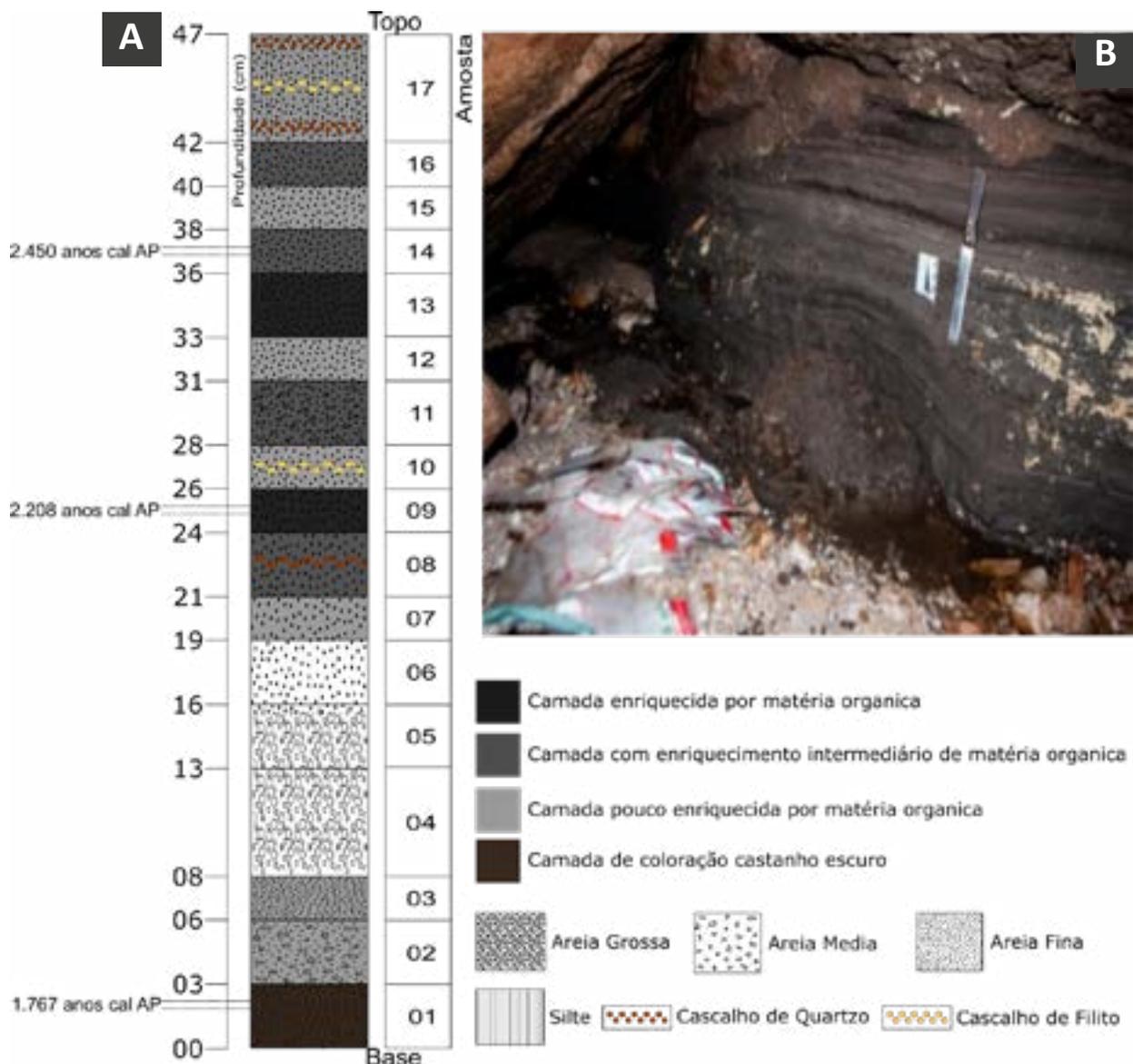


Figura 8 - A) Coluna estratigráfica com idades radiocarbônicas; B) Pacote de sedimentos da Caverna do Galo. Foto de janeiro de 2020 (drenagem ativa). A espuma (branco), indica que o nível da água alcançou o teto da caverna pouco tempo antes do registro fotográfico.

Figure 8 - A) Stratigraphic column with radiocarbon ages; B) Galo Cave sediment package. Photo from January 2020 (active drainage). The white foam indicates that the water level reached the ceiling of the cave shortly before the photographic record.

Granulometria dos sedimentos

Os sedimentos apresentaram composição granulométrica dominada por areia fina e média, com cerca de 67% do material entre 0,125 e 0,5 mm, em média (Tabela 2). As camadas superiores (36 a 47 cm) apresentaram maiores teores de areia grossa e muito grossa (média de 22,4% de material entre 0,5 e 2 mm nessas camadas contra 7,3% nas demais) e de cascalho (média de 8,6% de material acima de 2 mm nessas camadas contra 1,2% nas demais). Pela classificação de Folk (1954), quase todas as camadas se enquadram na classe de areia, exceto a camada de 24 a 26 cm, de granulometria mais fina e classificada como areia lamosa. O predomínio dessas frações no sedimento é explicado pelas características dos solos epígeos, que apresentam teores de areia de cerca de 90% ao longo de todo o perfil (Silva *et al.*, 2004).

Sediment granulometry

The sediments presented a granulometric composition dominated by fine and medium sand, with about 67% of the material between 0.125 and 0.5 mm (Table 2). The upper layers (36 to 47 cm) showed higher contents of coarse and very coarse sand (average of 22.4% of material between 0.5 and 2 mm in these layers against 7.3% in the others) and gravel (average 8.6% of material above 2 mm against 1.2% in the others layers). According to Folk's classification (1954), most of the layers fall into the sand class, except for the layer from 24 to 26 cm, which is finer grained and classified as muddy sand. The predominance of these fractions in the sediment is explained by the characteristics of the epigeous soils, which present roughly 90% sand contents throughout the profile (Silva *et al.*, 2004).

Tabela 1 - Características morfológicas das camadas sedimentares descritas no pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Coord.	Alt.	Amostra	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Cor seca (Munsell)	Aspecto
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	17	42-47	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presença de cascalho (anguloso < 3 cm diâmetro, quartzo e filito); silte; areia fina. Pouca matéria orgânica.
		16	40-42	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Maior teor de matéria orgânica e maior plasticidade quando comparado ao anterior.
		15	38-40	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Areia fina com presença de matéria orgânica.
		14	36-38	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Material plástico, rico em matéria orgânica. Presença de areia fina.
		13	33-36	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presença de areia fina, com enriquecimento de matéria orgânica, em relação a camada anterior.
		12	31-33	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predomínio de areia fina, com empobrecimento de matéria orgânica.
		11	28-31	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presença de areia fina e média, com o enriquecimento de matéria orgânica, em relação à camada anterior.

Coord.	Alt.	Amostra	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Cor seca (Munsell)	Aspecto
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Material mais claro que a camada anterior. Presença de areia fina e cascalho.
		9	24-26	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Material plástico com alto teor de matéria orgânica, quando comparado a todas as camadas anteriores. Presença de areia muito fina.
		8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Material mais claro que a camada anterior. Presença de areia fina e cascalho.
		7	19-21	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predomínio de areia fina. Material mais fino que a camada anterior
		6	16-19	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia fina. Material mais fino que a camada anterior
		5	13-16	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia grossa. Cor mais clara
		4	8-13	Gley 1 4/N	Gley 1 6/N	Predomínio de areia grossa. Cor mais clara
		3	6-8	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor mais clara que a primeira camada.
		2	3-6	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor mais clara que a camada anterior.
		1	0-3	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor castanha escura.

Cores Munsell - Gley 1 2,5/N: preta; Gley 1 3/N: cinza muito escura; Gley: 1 4/N: cinza escura; Gley 1 5/N: cinza.

Table 1 - Morphological characteristics of the sediment layers described in the Galo Cave sediment package.

Coord.	Alt.	Sample	Depth (cm)	Humid color (Munsell)	Dry color (Munsell)	Aspect
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	17	42-47	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presence of gravel (angular < 3 cm diameter, quartz and phyllite); silt; fine sand. Low organic matter.
		16	40-42	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Higher organic matter content and greater plasticity when compared to the previous.
		15	38-40	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Fine sand with organic matter presence.
		14	36-38	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Plastic material, rich in organic matter. Presence of fine sand.
		13	33-36	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presence of fine sand, enriched in organic matter, in relation to the previous layer.

Coord.	Alt.	Sample	Depth (cm)	Humid color (Munsell)	Dry color (Munsell)	Aspect
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	12	31-33	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predominance of fine sand, with depletion of organic matter.
		11	28-31	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presence of fine and medium sand, with the enrichment of organic matter, in relation to the previous layer.
		10	26-28	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presence of gravel (phyllite < 2 cm). Lighter color than the previous layer
		9	24-26	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Plastic material with high organic matter content, compared to all previous layers Presence of very fine sand
		8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Lighter colored material than the previous layer Presence of fine sand and gravel
		7	19-21	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predominance of fine sand. Finer material than the previous layer
		6	16-19	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Fine sand predominates. Finer material than previous layer
		5	13-16	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predominantly coarse sand. Lighter color
		4	8-13	Gley 1 3/N	Gley 1 6/N	<i>Predominance of coarse sand. Lighter color</i>
		3	6-8	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with presence of organic matter. Lighter color than the first layer.</i>
		2	3-6	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with presence of organic matter. Lighter color than the previous layer.</i>
		1	0-3	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with the presence of organic matter. Dark brown color.</i>

Cores Munsell - Gley 1 2,5/N: preta; Gley 1 3/N: cinza muito escura; Gley: 1 4/N: cinza escura; Gley 1 5/N: cinza.

A distribuição dos valores de diâmetro médio geométrico, desvio padrão, coeficiente de assimetria e curtose ressaltou diversas diferenças entre as camadas sedimentares (Figura 9). O diâmetro médio geométrico apresentou apenas ligeira variação ao longo de quase todas as camadas da base e do centro do pacote, com diferenças mais marcantes somente nas camadas superiores, de 36 a 47 cm, onde os valores foram mais elevados, conforme indicado anteriormente pelos maiores teores de areia grossa e cascalho (Tabela 2). Essas camadas apresentaram também valores mais altos de desvio padrão geométrico (DPG), indicando mudanças

The distribution of the geometric mean diameter, standard deviation, asymmetry and kurtosis coefficient values highlighted several differences among the sedimentary layers (Figure 9). The geometric mean diameter (GMD) showed only slight variation along almost all layers in the base and center of the package. Greater differences were shown in the upper layers, from 36 to 47 cm, where the values were higher, indicated by the higher contents of coarse sand and gravel (Table 2). These layers also presented higher geometric standard deviation (GSD) values, indicating changes in the sedimentation process, possibly related to origin or transport (Nichols,

no processo de sedimentação, possivelmente relacionadas à origem ou ao transporte (Nichols, 2009). Valores mais elevados do DPG foram observados também nas camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm. Todas as camadas apresentaram coeficientes de assimetria negativos, indicando distribuição de frequência assimétrica à esquerda, ou seja, com predomínio de menores valores, já que as frações predominantes foram de areias média e fina (Tabela 2).

2009). Higher GSD values were also observed in the 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers. All layers showed negative asymmetry coefficients, indicating left-symmetric frequency distribution, i.e., with predominance of lower values, since the predominant fractions were medium and fine sands (Table 2).

Tabela 2 – Distribuição granulométrica (%) das camadas de sedimento amostradas no pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Camada (cm)	Cascalho	Areia muito grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia muito fina		Silte + argila
	> 2 mm	2 a 1 mm	1 a 0,5 mm	0,5 a 0,25 mm	0,25 a 0,125 mm	0,125 a 0,106 mm	0,106 a 0,053 mm	< 0,053 mm
42 a 47	10,6	6,9	11,3	20,9	26,6	4,9	11,4	7,4
40 a 42	12,2	13,0	18,5	23,6	19,0	3,3	7,8	2,7
38 a 40	6,2	3,7	7,3	27,0	38,0	5,2	10,2	2,4
36 a 38	5,6	12,8	16,2	24,3	25,2	4,2	8,7	2,9
33 a 36	0,1	0,3	1,6	24,8	56,1	6,0	9,5	1,8
31 a 33	0,2	1,3	4,1	31,6	48,9	5,1	7,6	1,3
28 a 31	0,7	2,3	8,5	37,5	40,9	3,7	5,4	1,0
26 a 28	2,7	0,5	1,9	31,0	51,0	4,6	7,1	1,1
24 a 26	2,0	10,8	12,0	13,1	23,8	6,5	22,4	9,3
21 a 24	2,5	0,6	2,1	23,3	50,2	6,5	12,5	2,4
19 a 21	1,1	1,6	5,9	33,8	43,5	5,0	7,8	1,2
16 a 19	0,4	1,3	4,6	30,7	50,4	4,8	7,0	0,9
13 a 16	0,3	1,3	7,8	32,8	46,0	4,2	6,4	1,1
8 a 13	3,5	2,8	8,1	22,8	36,9	6,2	13,9	5,8
6 a 8	0,4	0,8	2,6	20,6	53,9	6,4	11,6	3,7
3 a 6	0,6	2,0	4,3	22,1	42,9	7,5	17,2	3,2
0 a 3	0,8	1,4	4,8	26,4	46,2	6,4	10,9	3,2

Table 2 –Particle size distribution (%) of the sediment layers sampled from the Galo Cave sediment package.

Layer (cm)	Gravel	Very Coarse Sand	Coarse Sand	Medium Sand	Fine Sand	Very fine sand		Silt + clay
	> 2 mm	2 a 1 mm	1 a 0.5 mm	0.5 a 0.25 mm	0.25 a 0.125 mm	0.125 a 0.106 mm	0.106 a 0.053 mm	< 0.053 mm
42 a 47	10,6	6,9	11,3	20,9	26,6	4,9	11,4	7,4
40 a 42	12,2	13,0	18,5	23,6	19,0	3,3	7,8	2,7
38 a 40	6,2	3,7	7,3	27,0	38,0	5,2	10,2	2,4
36 a 38	5,6	12,8	16,2	24,3	25,2	4,2	8,7	2,9
33 a 36	0,1	0,3	1,6	24,8	56,1	6,0	9,5	1,8
31 a 33	0,2	1,3	4,1	31,6	48,9	5,1	7,6	1,3
28 a 31	0,7	2,3	8,5	37,5	40,9	3,7	5,4	1,0
26 a 28	2,7	0,5	1,9	31,0	51,0	4,6	7,1	1,1
24 a 26	2,0	10,8	12,0	13,1	23,8	6,5	22,4	9,3
21 a 24	2,5	0,6	2,1	23,3	50,2	6,5	12,5	2,4
19 a 21	1,1	1,6	5,9	33,8	43,5	5,0	7,8	1,2
16 a 19	0,4	1,3	4,6	30,7	50,4	4,8	7,0	0,9
13 a 16	0,3	1,3	7,8	32,8	46,0	4,2	6,4	1,1
8 a 13	3,5	2,8	8,1	22,8	36,9	6,2	13,9	5,8
6 a 8	0,4	0,8	2,6	20,6	53,9	6,4	11,6	3,7
3 a 6	0,6	2,0	4,3	22,1	42,9	7,5	17,2	3,2
0 a 3	0,8	1,4	4,8	26,4	46,2	6,4	10,9	3,2

A distribuição granulométrica de todas as camadas apresentou curvas leptocúrticas, com valores de curtose positivos, já que a fração areia fina apresentou amplo predomínio (41% em média) e o diâmetro médio geométrico situou-se justamente nessa fração para a maioria das camadas, originando curvas de distribuição com picos aguçados (Figura 10). Para as camadas superiores (36 a 47 cm) e para as camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm, que também apresentaram maior desvio, a curtose foi menor, com curvas de distribuição granulométrica mais suavizadas, ou seja, maior frequência de frações mais finas (8 a 13 cm e 24

The particle size distribution of all layers presented leptokurtic curves, with positive kurtosis values. That is because the fine sand fraction presented a wide predominance (41% on average) and the GMD was in this fraction for most layers, which originated distribution curves with sharp peaks (Figure 9). The kurtosis was lower, with smoother distribution curves for the upper layers (36 to 47 cm) and from the 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers, which also showed higher deviation, i.e., higher frequency of finer (8 to 13 cm and 24 to 26 cm) or coarser (upper layers) fractions. The asymmetry coefficient was markedly distinct only in the layers

a 26 cm) ou mais grosseiras (camadas superiores). O coeficiente de assimetria foi marcadamente distinto apenas nas camadas de 6 a 8 cm e de 33 a 36 cm, que apresentaram teores mais baixos de areia grossa e muito grossa e cascalho (Figura 9).

from 6 to 8 cm and 33 to 36 cm, which presented lower contents of coarse and very coarse sand and gravel (Figure 9).

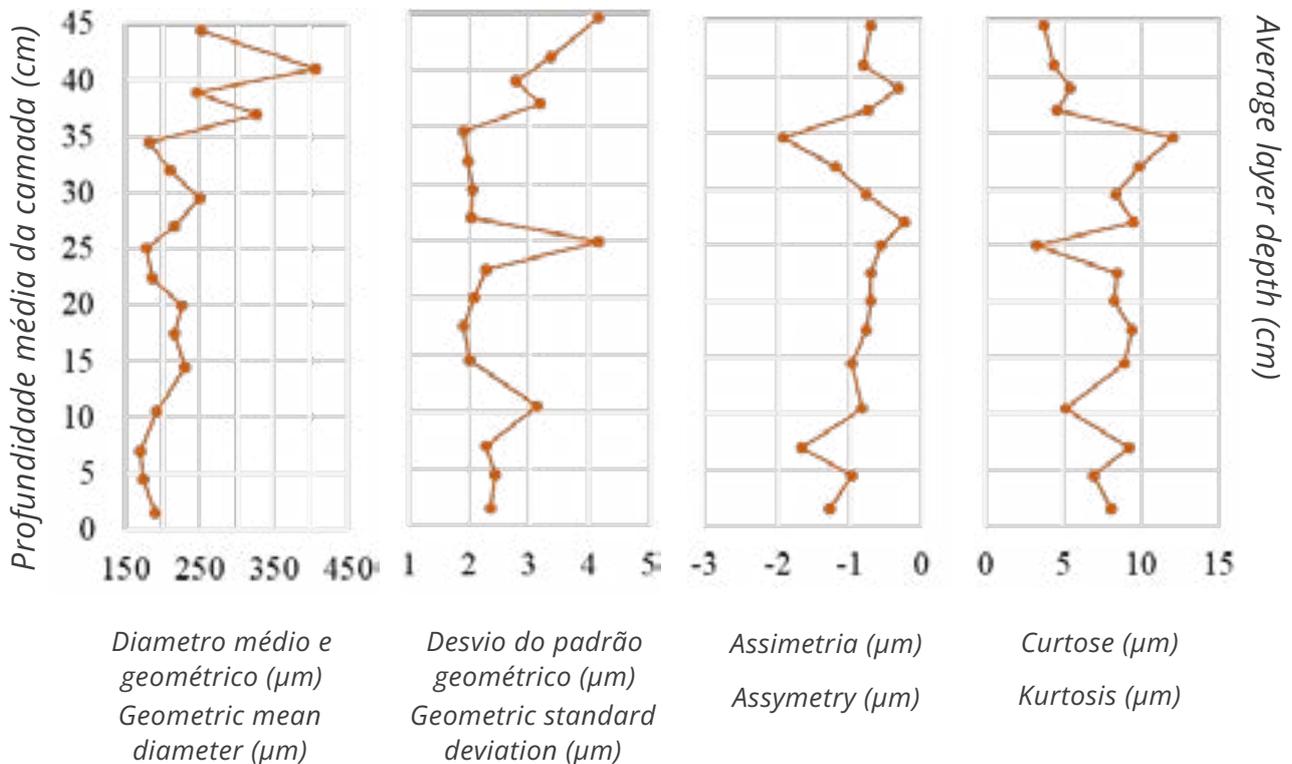


Figura 9 - Variação do diâmetro médio geométrico, do desvio padrão geométrico, do coeficiente de assimetria e da curtose para as camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figura 9 - Variation of the geometric mean diameter, geometric standard deviation, asymmetry coefficient and kurtosis for the layers of the Galo Cave sediment package.

A granulometria dos sedimentos (predomínio de areia, cascalho e silte) e o grau de seleção (em geral moderado) indicam que o pacote de sedimentos corresponde à faces de canal, cujas características do material dependem fortemente do regime de fluxo e da fonte dos sedimentos, que são transportados predominantemente como carga de fundo (Bosch & White, 2007). O diâmetro médio geométrico da maioria das camadas (entre 150 e 250 µm) corresponde em geral à faixa de menores tensões críticas de cisalhamento no diagrama de Hjulstrom, possivelmente indicando que os solos epígeos arenosos (Silva et al., 2004) sofreram ação erosiva de baixa intensidade, já que velocidades de fluxo de 0,2 m s⁻¹ seriam suficientes para a remoção dessas partículas, enquanto sua deposição ocorreria em velocidades inferiores a 0,02 m s⁻¹ (Nichols, 2009).

The sediments grain size (predominantly sand, gravel and silt) and degree of selection (generally moderate) indicate that the sediment package corresponds to a channel facies, whose material characteristics strongly depend on the flow regime and the source of the sediments, which are predominantly transported as bottom load (Bosch & White, 2007). The geometric mean diameter of most layers (between 150 and 250 µm) generally corresponds to the range of lowest critical shear stresses in the Hjulstrom diagram. This may indicate that the sandy epigeous soils (Silva et al., 2004) suffered low intensity erosive action, since flow velocities of 0.2 m s⁻¹ would be sufficient for the removal of these particles, while their deposition would occur at velocities lower than 0.02 m s⁻¹ (Nichols, 2009).

Os parâmetros relacionados à granulometria dos sedimentos indicaram mudanças no processo de sedimentação ao longo das camadas. As camadas do topo apresentaram granulometria mais grossa e menor grau de seleção (maior desvio e menor curtose), o que poderia indicar transporte por fluxos de água com maior velocidade (Nichols, 2009) e a menores distâncias, como pela mobilização de sedimentos de granulometria mais grossa já presentes no leito da caverna. De acordo com Bögli (1980), os materiais de granulometria mais grossa, como cascalho e calhaus, são comumente autóctones. Já as camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm também apresentaram menor grau de seleção, porém marcada pela maior presença de sedimentos com granulometria mais fina. Essa mudança no processo de sedimentação poderia estar relacionada ao escoamento superficial com menor velocidade ou maior tempo de permanência da água no leito de sedimentação (Nichols, 2009).

Geoquímica dos sedimentos

A variação da composição geoquímica ao longo das camadas indicou a contribuição de diferentes materiais (Figura 10), sendo bastante marcante a associação entre os picos de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3 nas camadas de 6 a 8 cm, de 24 a 26 cm, de 33 a 36 cm e de 42 a 47 cm. Nessas camadas, os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O foram em média 56%, 33% e 5,9% contra 70,7%, 23,3% e 3,5% nas demais camadas. Essas diferenças provavelmente se devem à maior contribuição de filito, uma vez que esta rocha apresenta elevados teores de moscovita [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], cuja composição química ideal seria 45,2% SiO_2 , 38,4% Al_2O_3 e 11,8% K_2O (Radoslovich, 1960).

Os teores de C acompanharam as tendências observadas na distribuição granulométrica e na composição geoquímica (Figura 11). Nas camadas superiores do pacote de sedimentos, que apresentaram maiores teores de C, a variação acompanhou o diâmetro médio geométrico. Nessas camadas, os maiores teores de C estiveram associados ao material de granulometria mais grossa. Eventos mais intensos de precipitação e escoamento superficial teriam transportado e depositado sedimentos de granulometria mais grossa e

Parameters related to sediment grain size indicated changes in the sedimentation process along the layers. The top layers showed coarser granulometry and lower degree of selection (higher deviation and lower kurtosis). This could indicate transport by higher velocity water flows (Nichols, 2009) and at shorter distances, as by the mobilization of coarser-grained sediments already present in the cave bed. According to Bögli (1980), coarser grained materials, such as gravel and pebbles, are commonly autochthonous. The 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers also presented a lower degree of selection, but were marked by the presence of more fine-grained sediments. This change in the sedimentation process could be related to surface runoff with lower velocity or longer time of water residence in the sedimentation bed (Nichols, 2009).

Sediment Geochemistry

The geochemical composition variation along the layers indicated the contribution of different materials (Figure 10). In the layers from 6 to 8 cm, from 24 to 26 cm, from 33 to 36 cm and from 42 to 47 cm it is quite remarkable the association between the peaks of Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 . In these layers, the SiO_2 , Al_2O_3 and K_2O contents average 56%, 33% and 5.9% against 70.7%, 23.3% and 3.5% in the other layers. These differences are probably due to the higher contribution of phyllite, since this rock presents high contents of muscovite [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], whose ideal chemical composition would be 45.2% SiO_2 , 38.4% Al_2O_3 and 11.8% K_2O (Radoslovich, 1960).

The C contents followed the trends observed in particle size distribution and geochemical composition (Figure 11). In the upper layers of the sediment package, which showed higher C contents, the variation followed the geometric mean diameter. In these layers, the higher C contents were associated with coarser grained material. More intense precipitation events and surface runoff could have transported and deposited coarser grained sediments and organic fragments, which were later humified. The layer from 24 to 26 cm showed the highest

fragmentos orgânicos, que posteriormente foram humificados. A camada de 24 a 26 cm apresentou o maior teor de C (30 g kg^{-1}). Essa camada apresentou maior contribuição de material de granulometria fina, possivelmente associado à inundação mais duradoura do local, porém provavelmente sob influência de eventos de precipitação de menor intensidade e maior duração.

C content (30 g kg^{-1}). This layer showed a greater contribution of fine-grained material, possibly associated with the longer-lasting flooding of the site, but probably under the influence of precipitation events of lower intensity and longer duration.

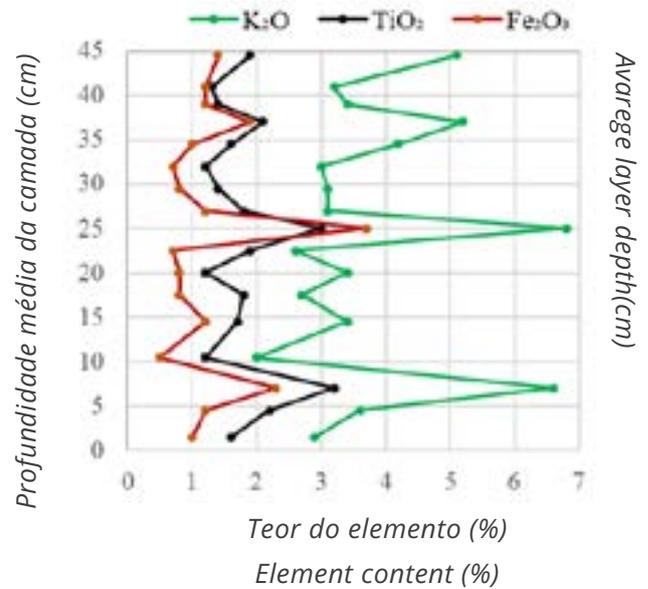
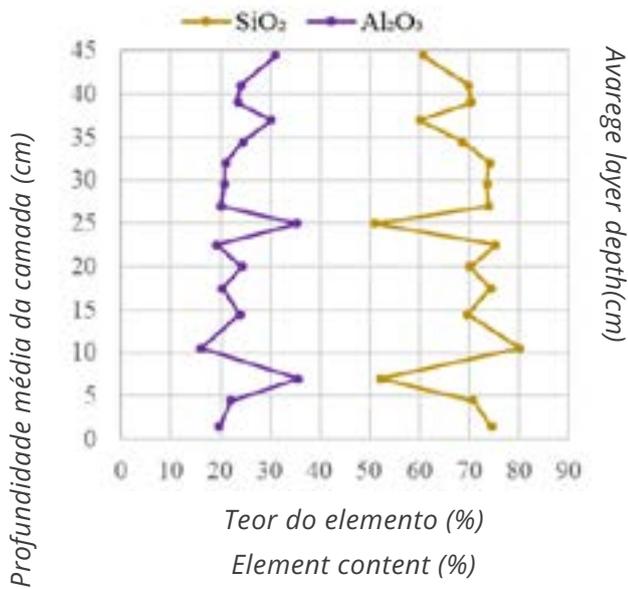


Figura 10 – Composição geoquímica das camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 10 – Geochemical composition of the layers on Galo Cave sediment package.

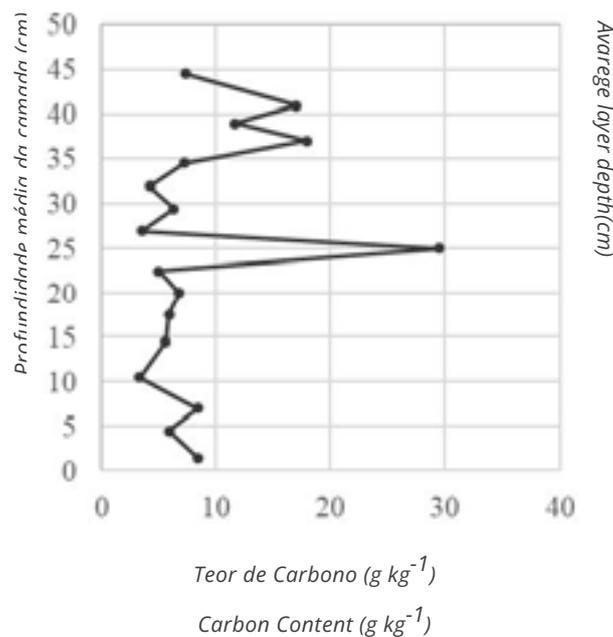


Figura 11 – Variação do teor de carbono ao longo das camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 11 – Variation in carbon content along the layers of the Galo Cave sediment package.

A distribuição dos pontos no biplot da análise de componentes principais (Figura 12) indica períodos de instabilidade na deposição de sedimentos, com mudanças marcantes tanto na composição geoquímica quanto na distribuição granulométrica. As quatro camadas superiores localizaram-se em um mesmo quadrante, associado a maiores teores de cascalho (todas as camadas de 36 a 47 cm), menores teores de areia fina e, conseqüentemente, menor curtose e maior desvio padrão. Contudo, mesmo as camadas mais homogêneas em relação às demais em termos de granulometria apresentaram diferenças na composição geoquímica, com maior contribuição de filito (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3), como nas camadas de 36 a 38 cm e de 42 a 47 cm. Essas diferenças podem indicar ciclos de deposição afetados principalmente por material proveniente de locais próximos ou do próprio leito da caverna, com transporte ora de material mais quartzoso, ora mais rico em filito.

The distribution of the points in the principal components analysis biplot (Figure 12) indicates periods of instability in sediment deposition, with marked changes in both geochemical composition and particle size distribution. The top four layers were located in the same quadrant, associated with higher gravel contents (all layers from 36 to 47 cm), lower fine sand contents, and consequently lower kurtosis and higher standard deviation. However, even the layers that were more homogeneous in terms of grain size showed differences in geochemical composition, with a higher contribution of phyllite (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents), as in the layers from 36 to 38 cm and from 42 to 47 cm. These differences may indicate deposition cycles mainly affected by material coming from nearby sites or from the cave bed itself, with quartz and phyllite-rich material transport.

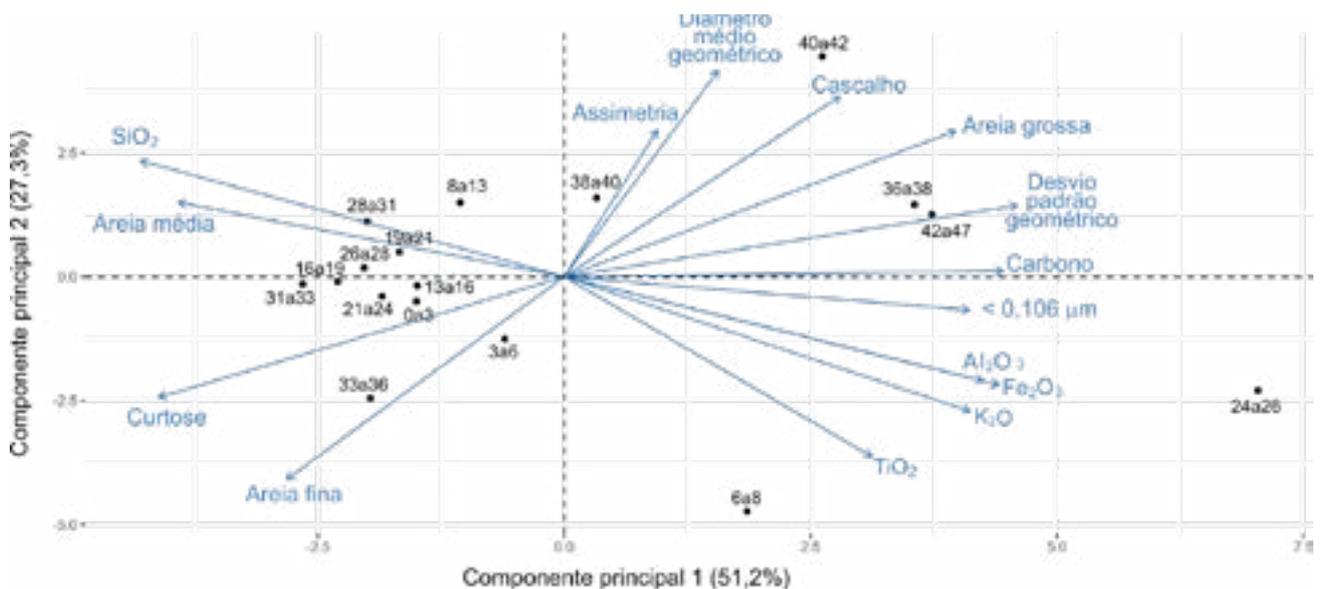


Figura 12 – Biplot da análise de componentes principais para distribuição granulométrica, composição geoquímica e teor de C (variáveis indicadas por setas) nas diferentes camadas de sedimento (profundidades, em cm, indicadas junto aos pontos das observações) da Caverna do Galo. Areia fina: 0,106-0,25 mm. Areia média: 0,25-0,5 mm. Areia grossa: 0,5-2 mm.

Figure 12 – Biplot of the principal component analysis for particle size distribution, geochemical composition, and C content (variables indicated by arrows) in the different sediment layers (depths, in cm, indicated next to the observation points) of Galo Cave. Fine sand: 0.106-0.25 mm. Medium sand: 0.25-0.5 mm. Coarse sand: 0.5-2 mm.

As camadas abaixo de 36 cm apresentaram em geral maior homogeneidade entre si, permanecendo agrupadas em decorrência do amplo predomínio de areia média e fina e dos teores mais elevados de SiO_2 em detrimento dos demais elementos. Essa estabilidade dos ciclos de sedimentação, em termos de fontes e dinâ-

The layers below 36 cm presented in general more homogeneity among themselves. They remained grouped due to the wide predominance of medium and fine sand and to the higher SiO_2 content in detriment of the other elements. This stability of the sedimentation cycles, in terms of sources and transport and

mica de transporte e deposição, foi marcadamente alterada apenas nas camadas de 6 a 8 cm e de 24 a 46 cm. A camada de 6 a 8 cm diferenciou-se principalmente pela maior contribuição de filito (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3), porém a distribuição granulométrica não foi tão distinta, indicando mudanças principalmente na fonte de sedimentos e não tanto no processo de transporte (velocidade do escoamento superficial e dinâmica de sedimentação). Já a camada de 24 a 26 cm foi marcadamente distinta das demais tanto na composição geoquímica (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3) quanto na distribuição granulométrica (granulometria mais fina, com 31,7% das partículas com diâmetro inferior a 0,106 mm). Essa camada possivelmente foi depositada sob condições com maior tempo de residência da água nessa porção da caverna, possibilitando a deposição de partículas mais finas.

Datações radiocarbônicas e dinâmica da sedimentação

A datação das amostras (Tabela 3) indicou ocorrência de contaminação, uma vez que, de acordo com Springer (2019), os sedimentos são depositados em leitos sedimentares, de forma plana, de baixo para cima. Devido às características da caverna, a deposição dos sedimentos mais recentes se dá pela inundação do local e sedimentação sobre as camadas mais antigas. Como o escoamento superficial carrega matéria orgânica em solução e suspensão, ao infiltrar-se no material arenoso essa carga orgânica é depositada. Assim, essa deposição é muito mais frequente nas camadas inferiores, que não dependem da ocorrência de eventos de precipitação tão intensos para receberem esse aporte orgânico. Com isso, a camada mais profunda apresentou menor idade (1.767 anos cal AP), enquanto a camada superior apresentou maior idade (2.450 anos cal AP).

deposition dynamics, was notably altered only in the 6 to 8 cm and 24 to 46 cm layers. The 6 to 8 cm layer was differentiated mainly by the higher contribution of phyllite (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents). However, the particle size distribution was not so distinct, indicating changes mainly in the sediment source and not so much in the transport process (runoff velocity and sedimentation dynamics). The 24 to 26 cm layer was markedly different from the others both in geochemical composition (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents) and in particle size distribution (finer particle size, with 31.7% smaller than 0.106 mm in diameter). This layer was possibly deposited under longer water residence time in this portion of the cave, allowing the deposition of finer particles.

Radiocarbon dating and sedimentation dynamics

Samples dating (Table 3) indicated occurrence of contamination, since, according to Springer (2019), sediments are deposited in sedimentary beds in a flat, bottom-up fashion. Due to the cave characteristics, deposition of the more recent sediments occurs by flooding the site and sedimentation over the older layers. As the surface runoff, carrying organic matter, infiltrates the sandy material, this organic load is deposited. Therefore, this deposition is much more frequent in the lower layers, because it does not depend on the occurrence of such intense precipitation events to receive this organic input. Thus, the deeper layer showed a lower age (1,767 cal yr BP), while the upper layer showed a higher age (2,450 cal yr BP).

As taxas de sedimentação (Tabela 3), mesmo negativas, mostram claramente que há necessidade de eventos de precipitação mais intensos para que os sedimentos fossem depositados nas camadas superiores. Estes resultados estão de acordo com a granulometria mais grossa destas camadas (Tabela 2) e com a análise de componentes principais, que agrupou em um quadrante as camadas acima de 36 cm (Figura 12).

The negative sedimentation rates (Table 3), clearly show that more intense precipitation events are needed for sediments to be deposited in the upper layers. These results are in agreement with the coarser granulometry of these layers (Table 2) and with the principal component analysis, which grouped in a same quadrant the layers above 36 cm (Figure 12).

Tabela 3 - Datações radiocarbônicas de amostras coletadas na Caverna do Galo.

Prof. (cm)	CENA/Amostra	Idade (anos AP)	Idade calibrada (anos cal AP)	Idade média calibrada (anos cal AP)	Taxa de sedimentação (mm ano ⁻¹)
37	CENA 1325/01*	2.481 ± 28	2.356 – 2.543	2.450	-0,50
25	CENA 1326/09	2.274 ± 28	2.139 – 2.276	2.208	-0,52
2	CENA 1327/14	1.869 ± 33	1.699 – 1.834	1.767	

*Laboratório 14C – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

Table 3 - Radiocarbon dating of samples collected in Galo Cave.

Depth (cm)	CENA/Sample	Age (yr BP)	Calibrated age (cal yr BP)	Average calibrated age (cal yr BP)	Sedimentation rate (mm yr ⁻¹)
37	CENA 1325/01*	2.481 ± 28	2.356 – 2.543	2.450	-0,50
25	CENA 1326/09	2.274 ± 28	2.139 – 2.276	2.208	-0,52
2	CENA 1327/14	1.869 ± 33	1.699 – 1.834	1.767	

*Laboratory 14C – CENA (Center for Nuclear Energy in Agriculture at the University of São Paulo).

Silva et al. (2004) dataram por 14C camadas de 2 perfis de solos do topo da Serra São José, situados a cerca de 200 m da entrada da Caverna do Galo, a 1.360 m de altitude. Um dos perfis, classificado como Neossolo Flúvico Psamítico típico (Santos et al., 2018), apresentou várias camadas arenosas entremeadas a camadas arenosas enriquecidas com matéria orgânica, resultado de sucessivos ciclos de deposição laminar, com morfologia semelhante ao pacote de sedimentos deste estudo.

Silva et al. (2004) dated by 14C layers of two soil profiles from the top of Serra São José, located about 200 m from the entrance of Galo Cave, at 1,360 m altitude. One of the profiles, classified as typic Psammitic Fluviic Neosol (Santos et al., 2018) or Typic Ustifluvents (Soil Survey Staff, 2014), showed several sandy layers interspersed with organic matter enriched sandy layers. This is the result of successive cycles of laminar deposition, with morphology similar to the sediment

As taxas de sedimentação deste perfil variaram de 1,8 a 3,6 mm ano⁻¹ e a idade radiocarbônica da camada situada a 105 cm foi de 390 anos AP. O outro perfil, um Paleossolo (Neossolo Flúvico Psamítico típico) apresentou idade radiocarbônica da camada de 175 cm de 24.165 anos cal AP e taxas de sedimentação muito variadas, entre 0,02 e 3,5 mm ano⁻¹, porém os valores mais elevados foram obtidos nas camadas mais superficiais, mais recentes. Estes dados nos permitem inferir que as taxas de sedimentação na superfície da Serra São José também estão relacionadas com a intensidade e duração de eventos de precipitação.

Em estudos de reconstituição ambiental realizados na Serra do Espinhaço Meridional (MG), a 300 km do local deste estudo, utilizando análises multi-proxy (isótopos de C e N, fitólitos, polens, geoquímica, estratigrafia), foram obtidas várias evidências de mudanças climáticas durante o Holoceno (Horák-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018; Machado et al., 2021), com períodos de maior umidade e temperaturas mais elevadas ou mais baixas e períodos mais secos com temperaturas mais elevadas.

O D10 médio calculado foi de 91 μm (D10 corresponde ao diâmetro médio abaixo do qual passam apenas 10% das partículas). Assim, o tempo de sedimentação para 90% das partículas seria inferior a um minuto, em média, de acordo com a Lei de Stokes. Então, o tempo de residência da água no final da Caverna do Galo precisaria ser bem pequeno para possibilitar a deposição dos sedimentos. Nesse caso, o que provavelmente exerce maior influência no processo de sedimentação é a vazão de entrada do escoamento superficial, que deve superar a vazão de saída no sumidouro ao final da caverna para preencher o fundo da cavidade, onde o pacote de sedimentos se localiza. Supondo um tempo de concentração de 10 minutos para a bacia de contribuição da caverna e um volume de 230 m³ para a seção final, onde o pacote de sedimentos se assenta, seria necessária uma chuva com intensidade de 88.8 mm h⁻¹ para preencher essa cavidade final da Caverna do Galo e submergir completamente o pacote de sedimentos. De acordo com a equação de chuvas intensas estimada por Bello (2018) para o município de São João Del Rei, essa chuva teria tempo de retorno de apenas 1 ano, ou seja, o pacote de

package of this study. The sedimentation rates of this profile varied from 1.8 to 3.6 mm yr⁻¹ and the radiocarbon age of the layer at 105 cm was 390 yr BP. The other profile, a Paleosol (typical Psammitic Fluvic Neosol or Typic Ustifluvents) showed a radiocarbon age of the 175 cm layer of 24,165 cal yr BP and varied sedimentation rates, between 0.02 and 3.5 mm yr⁻¹, but the highest values were obtained in the upper, most recent layers. These data allow us to infer that sedimentation rates at the surface of Serra São José are also related to the intensity and duration of precipitation events.

Several evidences of Holocene climatic changes were obtained in environmental reconstitution studies conducted in the Serra do Espinhaço Meridional (MG), 300 km from the site of this study (Horák-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018; Machado et al., 2021). Those studies used multi-proxy analyses (C and N isotopes, phytoliths, pollens, geochemistry, stratigraphy), and showed periods of higher humidity and higher or lower temperatures and drier periods with higher temperatures.

The calculated average D10 was 91 μm (D10 corresponds to the average diameter below which only 10% of the particles pass). Thus, according to Stokes' Law the sedimentation time for 90% of the particles would be on average less than one minute. Therefore, the residence time of the water at the end of Galo Cave would need to be very short to allow the deposition of the sediments. In this case, what probably has the greatest influence on the sedimentation process is the inflow of surface runoff, which must exceed the outflow of the cave in order to fill the bottom of the cavity. Assuming a concentration time of 10 minutes for the contribution basin of the cave and a volume of 230 m³ for the final section, an 88.8 mm h⁻¹ rainfall would be necessary to fill this final cavity of the Galo Cave and completely submerge the sediment package. According to the equation of intense rainfall estimated by Bello (2018) for the municipality of São João Del Rei, this rainfall would have a return time of only 1 year, i.e., the sediment package could be submerged annually by surface runoff. This hypothesis is corroborated by the observations made in loco of the presence of foam and signs

sedimentos poderia ser submerso anualmente pelo escoamento superficial. Essa hipótese é corroborada pelas observações feitas *in loco* da presença de espuma e sinais de passagem de água indo até a porção superior do pacote de sedimentos (Figura 8).

Supondo que a camada superior não tenha sofrido contaminação por matéria orgânica mais recente e que sua idade seja de fato de 2.450 anos, pode-se estimar a "idade real" das demais camadas considerando uma taxa de contaminação uniforme (linear) ao longo de todo o pacote, uma vez que que o modelo idade x profundidade (Figura 13) indica essa tendência linear de distribuição das idades.

of water passing up to the upper portion of the sediment package (Figure 8).

Assuming that the upper layer has not been contaminated by more recent organic matter and that its age is in fact 2,450 years, and since the age x depth model (Figure 13) indicates this linear trend of age distribution, one can estimate the "real age" of the other layers by considering a uniform (linear) contamination rate throughout the package.

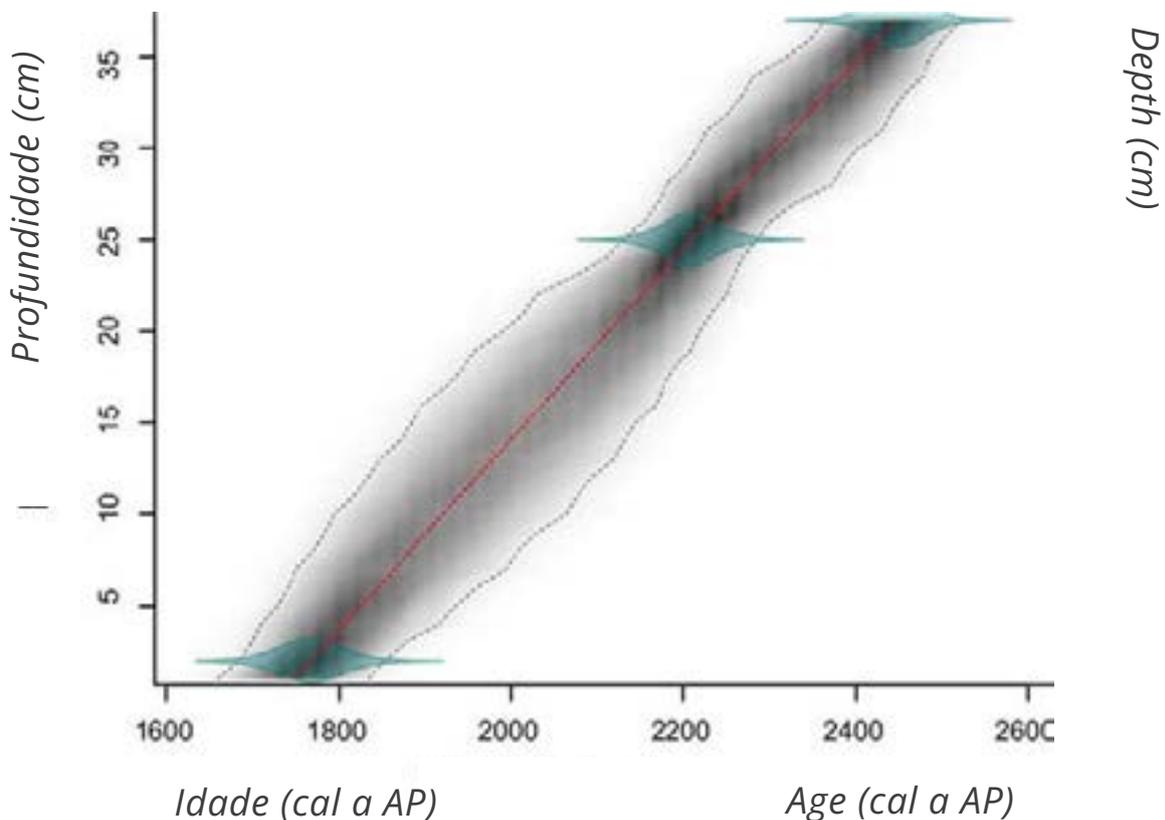


Figura 13 – Modelo idade x profundidade para o pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 13 – Age x depth model for Galo Cave sediment package.

Supondo que chuvas com intensidade de 20 mm h⁻¹, 30 mm h⁻¹ e 40 mm h⁻¹ seriam suficientes para submergir as camadas de 2, 25 e 37 cm e considerando a distribuição de eventos de precipitação obtidos na Estação Meteorológica Automática de São João Del Rei para o período 2007-2020 (Tabela 4), as camadas de 37, 25 e 2 cm teriam sofrido respectivamente 1.750 (10 eventos em 14

Assuming that rainfall with intensity of 20 mm h⁻¹, 30 mm h⁻¹ and 40 mm h⁻¹ would be enough to submerge the layers of 2, 25 and 37 cm and considering the distribution of precipitation events obtained from the Automatic Weather Station of São João Del Rei for the period 2007-2020 (Table 4). The layers of 37, 25 and 2 cm would have suffered respectively

anos, 1.750 em 2.450 anos), 4.416 (28 eventos em 14 anos, 4.416 eventos em 2.208 anos) e 12.631 eventos de inundação (100 eventos em 14 anos e 12.621 eventos em 1.767 anos). Considerando o Método Racional de estimativa do escoamento superficial (com coeficiente de escoamento igual a 0,3 e área da bacia de 5,18 ha), esses eventos seriam capazes de drenar para o interior da caverna 51,8, 77,7 e 103,6 m³ de água, que seriam capazes de inundar uma área de 2.590 m² com 2 cm de profundidade, 311 m² com 25 cm de profundidade e 280 m² com 37 cm de profundidade.

1,750 (10 events in 14 years, 1,750 in 2,450 years), 4,416 (28 events in 14 years, 4,416 events in 2,208 years) and 12,631 flood events (100 events in 14 years and 12,621 events in 1,767 years). Considering the Rational Method of estimating surface runoff (with runoff coefficient equal to 0.3 and basin area of 5.18 ha), these events would be able to drain into the cave 51.8, 77.7 and 103.6 m³ of water. This volume would be able to flood an area of 2,590 m² with 2 cm depth, 311 m² with 25 cm depth and 280 m² with 37 cm depth.

Tabela 4 – Ocorrência de eventos de precipitação de acordo com a intensidade na Estação Meteorológica Automática de São João Del Rei (A514).

Intensidade da precipitação	Eventos (2007-2020)	Eventos/ano
>50 mm/h	3	0,2
40-50 mm/h	7	0,5
30-40 mm/h	18	1,4
20-30 mm/h	72	5,5
Soma	100	7,7

Table 4 – Occurrence of precipitation events according to intensity at the Automatic Weather Station of São João Del Rei (A514).

Precipitation Intensity	Events (2007-2020)	Events/year
>50 mm/h	3	0,2
40-50 mm/h	7	0,5
30-40 mm/h	18	1,4
20-30 mm/h	72	5,5
Total	100	7,7

Considerando a proporção de eventos entre camadas igual a 1:2,52:7,21 (1.750 eventos a 37 cm, 4.416 eventos a 25 cm e 12.631 eventos a 2 cm) e a idade de 2.450 anos cal AP para a camada de 37 cm, a idade das demais camadas foram estimadas em 5.554 anos cal AP para a camada de 25 cm e 12.740 anos para a camada de 2 cm, com taxas de sedimentação de 0,032 mm ano⁻¹ (entre 2 e 25 cm) e de 0,039 mm ano⁻¹ (entre 25 e 37 cm). Essas idades e taxas de sedimentação estão em consonância com os valores encontrados por Silva et al. (2004) para solos da Serra São José.

Considering the ratio of events between layers equal to 1:2.52:7.21 (1,750 events at 37 cm, 4,416 events at 25 cm, and 12,631 events at 2 cm) and the age of 2,450 cal yr BP for the 37 cm layer. The ages of the other layers were estimated at 5.554 cal yr BP for the 25 cm layer and 12,740 cal yr BP for the 2 cm layer, with sedimentation rates of 0.032 mm yr⁻¹ (between 2 and 25 cm) and 0.039 mm yr⁻¹ (between 25 and 37 cm). These ages and sedimentation rates are in agreement with values found by Silva et al. (2004) for Serra São José soils.

As idades inferidas podem estar relacionadas às mudanças climáticas holocênicas. A elevação das temperaturas e o aumento da umidade na transição Pleistoceno/Holoceno (Horak-Terra et al., 2015; Costa, 2018; Machado et al., 2021) teriam propiciado o início da formação do pacote dos sedimentos (idade estimada na base de 12.740 anos AP). Um período mais úmido e com temperaturas mais baixas no Holoceno Médio (Horak-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018) poderia ter proporcionado a ocorrência de eventos de precipitação não tão intensos, mas de longa duração, induzindo a formação da camada mais rica em matéria orgânica e de granulometria mais fina (camada de 24 a 26 cm, com idade estimada de 5.554 anos cal AP). Períodos mais secos e de grande instabilidade na bacia hidrográfica, sugerindo extremos de precipitação, como os encontrados entre 2.400 e 2.100 anos cal AP por Costa (2018), poderiam conter energia o suficiente para transportar sedimentos mais grosseiros e formar as camadas superiores (camadas entre 36 e 47 cm, com idade de 2.450 anos cal AP), fechando o pacote de sedimentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Caverna do Galo foi formada pelas águas meteóricas e sua morfologia foi influenciada pelo falhamento NNW/SSE e pela diferença de dureza entre as rochas componentes (quartzito e filito).

Um pacote de sedimentos foi depositado preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da caverna, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação.

A morfologia e as composições granulométrica e química dos sedimentos e a idade radiocarbônica variam ao longo do pacote, evidenciando oscilações na intensidade e duração de eventos de precipitação, que podem estar associados a mudanças climáticas holocênicas.

The inferred ages may be related to Holocene climate change. Rising temperatures and increasing humidity in the Pleistocene/Holocene transition (Horak-Terra et al., 2015; Costa, 2018; Machado et al., 2021) would have provided the onset of sediment package formation (estimated base age 12,740 cal yr BP). A wetter period with lower temperatures in the Middle Holocene (Horak-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018) could have provided the occurrence of not so intense but long-lasting precipitation events, inducing the formation of the more organic-rich and finer-grained layer (24 to 26 cm layer, with an estimated age of 5,554 cal yr BP). Drier and highly unstable periods in the watershed, suggesting extreme precipitations, such as those found between 2,400 and 2,100 cal yr BP by Costa (2018), could contain enough energy to transport coarser sediments and form the upper layers (layers between 36 and 47 cm, with an age of 2,450 cal yr BP), closing the sediment package.

FINAL CONSIDERATIONS

Meteoric waters formed Galo Cave and the NNW/SSE faulting influenced its morphology, in addition to the difference in hardness between the component rocks (quartzite and phyllite).

The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling.

The morphological, granulometric and chemical compositions of the sediments and the radiocarbon age vary throughout the package. This indicated oscillations in the intensity and duration of precipitation events, which may be associated with Holocene climatic changes.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- AULER, A. S.; SAURO, F. Quartzite and quartz sandstone caves of South America. In *Encyclopedia of Caves*. Academic Press, p. 850-860, 2019.
- AULER, A. S.; SMART, P. L.; WANG, X.; PILÓ, L. B.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*, 106(1-2), p.142-153, 2009.
- BELLO, I. P. Regionalização de chuva intensa para o estado de Minas Gerais. 2018. 71 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas. Lavras: Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BLAAUW, M.; CHRISTEN, A.; LOPEZ, M. A. A. et al. rbacon: Age-Depth Modelling using Bayesian Statistics. R package version 2.5.6. 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=rbacon>
- BÖGLI, A. Endokarst and Karst Hydrology. In: *Karst Hydrology and Physical Speleology* Springer, Berlin, Heidelberg, p. 73-76, 1980.
- BOSCH, R. F.; WHITE, W. B. Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: *Studies of cave sediments*. Springer, Boston, MA, p. 1-22, 2007.
- BROOK, G. A.; RAILSBACK, L. B.; CAMPBELL, A. C.; ROBBINS, L. H.; MURPHY, M. L.; HODGINS, G.; MCHUGH, J. Radiocarbon ages for coatings on cupules ground in quartzite bedrock at Rhino Cave in the Kalahari Desert of Botswana, and their paleoclimatic significance. *Geoarchaeology*, 26(1), p.61-82, 2011.
- BUTZER, K. W. Geology of Nelson Bay Cave, Robberg, South Africa. *The South African Archaeological Bulletin*, 28(111/112), p. 97-110, 1973.
- COMIG - MAPA GEOLÓGICO - COMIG. Mapa Geológico Projeto Sul de Minas – Etapa I, Folha São João Del Rei, SF-23-X-C-II. Convênio.; COMIG-UFMG-UFRJ-UERJ, 2003.
- COSTA C. R. Reconstituição paleoambiental utilizando uma abordagem multi-proxy em um registro de turfeira tropical de montanha, Minas Gerais, Brasil. 2018. 130p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal. Diamantina: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.
- DAY, A. Cave surveying. *Cave Studies Series*, v. 11, p. 40, 2002.
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 17p, 1981. (Boletim de Extensão, 29)
- FABRI, F. P.; AULER, A. S.; CALUX, A. S.; CASSIMIRO, R.; AUGUSTIN, C. H. Cave morphology and controls on speleogenesis in quartzite: the example of the Itambè do Mato Dentro area in southeastern Brazil. *Acta Carsologica*, p.44(1), 2015.
- FARRANT, A. R.; SMART, P. L. Role of sediment in speleogenesis.; sedimentation and paragenesis. *Geomorphology*, v. 134, n. 1-2, p. 79-93, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.006>

FOLK, R.L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 62: p.344-359, 1954.

FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, 2007.

FOURNIER, J.; GALLON, R. K.; PARIS, R. G2Sd: a new R package for the statistical analysis of unconsolidated sediments. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, v. 20, n. 1, p. 73-78, 2014. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10513>

FUNDAÇÃO ALEXANDER BRANDT - FABRANDT. Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Proteção Ambiental (APA) São José, MG. Belo Horizonte: Convênio FNMA/FABRANDT (008/98), p. 117, 2000.

GUILD, G. E.; PALTRIDGE, N. G.; ANDERSSON, M. S.; STANGOULIS, J. C. An energy-dispersive X-ray fluorescence method for analysing Fe and Zn in common bean, maize and cowpea biofortification programs. *Plant and Soil*, p. 1-10, 2017.

HOGG, A.G.; HEATON, T.J.; HUA Q. et al. SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0-55,000 years cal BP. *Radiocarbon* 62, 2020. doi: 10.1017/RDC.2020.59

HORÁK-TERRA I.; CORTIZAS A.M.; LUZ C.F.P. et al. Late Quaternary vegetation and climate dynamics in central-eastern Brazil: insights from a ~35k cal a bp peat record in the Cerrado biome. *J. Quat. Sci.* 35, 664-676, 2020. <https://doi.org/10.1002/jqs.3209>

HORÁK-TERRA I.; MARTÍNEZ CORTIZAS A.; LUZ C.F.P.; et al. Holocene climate change in central-eastern Brazil reconstructed using pollen and geochemical records of Pau de Fruta mire (Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 437, p.117-131, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.07.027>

JENNINGS, J. N. *Karst geomorphology*. Oxford: Basil Blackwell Ltd., 1985.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Package 'factoextra'. Extract and visualize the results of multivariate data analyses, v. 76, R package version 1.0.7, 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

MACHADO, D.O.B.F; CHUENG, K.F; COE, H.H.G. et al. Paleoenvironmental reconstruction of the headwaters of the preto river, Minas Gerais state, Brazil, through siliceous bioindicators. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, p.103349, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103349>

NICHOLS, G. *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons, 2009.

O'CONNOR, S.; BARHAM, A.; APLIN, K.; MALONEY, T. Cave stratigraphies and cave breccias: Implications for sediment accumulation and removal models and interpreting the record of human occupation. *Journal of Archaeological Science*, 77, p.143-159, 2017.

PESSENDA L. C.; DE OLIVEIRA P. E.; MOFATTO M. et al. The evolution of a tropical rainforest/grassland mosaic in southeastern Brazil since 28,000 14C yr BP based on carbon isotopes and pollen records. *Quat. Res.* 71, p. 37-452, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.01.008>

R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL <https://www.R-project.org/>

RADOSLOVICH, E. W. The Structure of Muscovite, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$. Acta Crist. 13, p. 919-932, 1960. <https://doi.org/10.1107/S0365110X60002259>

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. Mapeamento de Cavernas - Guia Prático. Redespeleo Brasil, p. 93, 2005.

SAADI, A.; MAGALHÃES Jr.; A. P. MARQUES, M.R. UHE IRAPÉ. Etapa 1-Estudos de viabilidade: Meio ambiente Geomorfologia-Relatório Final. ENERCONSULT/CEMIG, VIR-3473, 1991

SANTOS, G.S, JACOMINE, P.K.T, ANJOS, L.H.C, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa, 5. ed., rev. e ampl., 2018.

SAURO, F.; DE WAELE, J.; ONAC, B. P.; GALLI, E.; DUBLYANSKY, Y.; BALDONI, E.; SANNA, L. Hypogenic speleogenesis in quartzite: the case of Corona'e Sa Craba Cave (SW Sardinia, Italy). Geomorphology, 211, p.77-88, 2014.

SCHULZ, H. P.; ERIKSSON, B.; HIRVAS, H.; HUHTA, P.; JUNGNER, H.; PURHONEN, P.; UKKOMEN, P.; RANKAMA, T. Excavations at Susiluola Cave. Suomen Museo, p. 5-45, 2002.

SILVA A. C. Solos do topo da serra de São José (Minas Gerais) e suas relações com o paleoclima no sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo - V28: p. 455 - 466. 2004.

SILVA, A. C.; VIDAL-TORRADO, P.; MARTINEZ-CORTIZAS, A.; GARCIA RODEJA, E. Solos do topo da serra de São José (Minas Gerais) e suas relações com o paleoclima no sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo - V28: p. 455 - 466. 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, p. 573, 2017.

TRAVASSOS, L. E. P. Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, p. 246. 2019.

TRIBOLO, C.; MERCIER, N.; LEFRAIS, Y.; MILLER, C. E.; PARKINGTON, J.; VALLADAS, H.; PORRAZ, G. Chronology of the Pleistocene deposits at Elands Bay Cave (South Africa) based on charcoals, burnt lithics, and sedimentary quartz and feldspar grains. Southern African Humanities, 29(1), p.129-152, 2016.

TWENHOFEL, W.H. Treatise on sedimentation. New York: Dover Publications, 1961.

**ASPECTOS ECOLÓGICOS DE DUAS GRANDES
COLÔNIAS DE MORCEGOS NECTARÍVOROS
(*ANOURA GEOFFROYI* GRAY, 1838)
RESIDENTES EM CAVERNAS NO BRASIL:
IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO**

*ECOLOGICAL ASPECTS OF TWO LARGE
NECTARIVOROUS BAT COLONIES (*ANOURA
GEOFFROYI* GRAY, 1838) RESIDENT IN BRAZILIAN
CAVES: IMPLICATIONS FOR CONSERVATION*

Autora

Aline da Silva Reis

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas
e-mail: alineambiental@yahoo.com.br

Coautores

Robson de Almeida Zampaulo; Sônia A. Talamoni

RESUMO

Morcegos da espécie *Anoura geoffroyi* possuem ampla distribuição na região neotropical, ocorrendo nas Américas do Norte, Central e do Sul. A formação de grandes colônias potencializa o importante papel ecológico desenvolvido pela espécie na polinização de grande variedade vegetal. Neste trabalho, foi realizado o estudo concomitante em duas colônias de *Anoura geoffroyi*, dando ênfase à estrutura e dinâmica populacional da espécie. Essas colônias se encontram localizadas em uma das principais regiões de interesse mineral do Brasil, o Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. Como resultados, observamos que as colônias representam populações numerosas com uma variação na densidade populacional acentuada ao longo do ano podendo agregar milhares de indivíduos durante o início do período reprodutivo. Ambas as colônias apresentaram comportamento de segregação sexual com os abrigos ocupados majoritariamente por machos nos primeiros meses do ano. As fêmeas chegam nas cavernas para

ABSTRACT

*Bats of the *Anoura geoffroyi* species have a wide distribution in the Neotropics, occurring in North, Central and South America. The formation of large colonies enhances the important ecological role developed by the species in the pollination of a wide variety of plants. In this work a concomitant study in two colonies of *Anoura geoffroyi* was conducted, emphasizing the structure and population dynamics of the species. These colonies are located in one of the main regions of mineral interest in Brazil, the Iron Quadrangle, state of Minas Gerais. It was observed that the colonies represent large populations with a marked variation in population density throughout the year and may aggregate thousands of individuals during the early reproductive period. Both colonies showed sexual segregation behavior with the shelters occupied mostly by males in the first months of the year. Females arrive in the caves for mating at the peak of the dry season. They remain in the shelter until*

acasalamento no pico da estação seca. Estas permanecem no abrigo até próximo do fim da gestação, abandonando as cavernas estudadas no início do verão onde procuram outro abrigo (colônia maternidade) para a conclusão da gestação (nascimento) e posterior cuidado dos filhotes. Desta forma, concluímos que as características intrínsecas da história natural da espécie têm implicações importantes para a sua conservação já que a preservação dos abrigos diurnos está intimamente relacionada com o ciclo reprodutivo da espécie. Por sua vez, a legislação brasileira vigente permite a supressão de cavidades naturais subterrâneas tendo como base estudos que, a depender do período de amostragem, podem ser insuficientes para detectar o uso destes abrigos essenciais para a conclusão do ciclo reprodutivo de espécies consideradas relativamente comuns, com um papel ecossistêmico fundamental para ambientes epígeos e subterrâneos, e que não constam nas listas oficiais de espécies ameaçadas de extinção.

PALAVRAS-CHAVE: segregação sexual, dinâmica populacional, estimativa populacional, captura e recaptura, abrigo diurno.

INTRODUÇÃO

O gênero *Anoura* Gray, 1838 (Chiroptera: Phyllostomidae) conta atualmente com 11 espécies descritas das quais apenas *Anoura caudifer* É. Geoffroy, 1818 e *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 possuem registros de ocorrência no Brasil (Mantilla-Meluk & Baker, 2010; Pacheco et al., 2018). *Anoura geoffroyi* é uma espécie nectarívora que possui ampla distribuição na região neotropical, ocorrendo nas Américas do Norte, Central e do Sul (Eisenberg & Redford, 1999). No Brasil, existem registros para a espécie em todos os biomas e regiões, tendo sido registrada no Distrito Federal e em mais 18 estados brasileiros (Reis et al., 2013; Reis et al., 2017). Com relação ao status de conservação, *A. geoffroyi* encontra-se na categoria de pouco preocupante, segundo a lista vermelha de espécies ameaçadas de extinção da International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2021). Da mesma forma, a espécie não está presente nas listas estaduais e federal do Brasil (COPAM, 2010; MMA, 2014).

nearly the end of gestation, leaving the studied caves in early summer where they seek another shelter (maternity colony) for the completion of gestation (birth) and subsequent care of the offspring. Therefore, it was concluded that the intrinsic characteristics of the natural history of the species have important implications for its conservation, since the preservation of diurnal shelters is closely related to the reproductive cycle of the species. In turn, the current Brazilian legislation allows the suppression of natural underground cavities based on studies that, depending on the sampling period, may be insufficient to detect the use of these essential shelters for the completion of the reproductive cycle of species. These that are considered relatively common, with a fundamental ecosystem role for epigeal and underground environments, and which are not on the official lists of endangered species.

KEYWORDS: sex segregation, population dynamics, population estimation, capture and recapture, daytime shelter.

INTRODUCTION

*The *Anoura* Gray, 1838 (Chiroptera: Phyllostomidae) genus currently has 11 described species of which only *Anoura caudifer* É. Geoffroy, 1818 and *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 have records of occurrence in Brazil (Mantilla-Meluk & Baker, 2010; Pacheco et al., 2018). *Anoura geoffroyi* is a nectarivorous species that has a wide distribution in the Neotropical region, occurring in North, Central and South America (Eisenberg & Redford, 1999). In Brazil, there are records of the species in all biomes and regions, having been recorded in the Federal District and 18 other Brazilian states (Reis et al., 2013; Reis et al., 2017). Regarding conservation status, *A. geoffroyi* is in the category of least concern, according to the red list of endangered species of the International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2021). Similarly, the species is not present in the state and federal lists of Brazil (COPAM, 2010; MMA, 2014).*

Os estudos mais específicos realizados no Brasil foram reconduzidos por Baumgarten & Vieira (1994), por Zortéa (2003) e Farias *et al.* (2018) e estão relacionados à reprodução, desenvolvimento e hábitos alimentares da espécie. A existência de colônias sexualmente segregadas de *A. geoffroyi* durante determinados períodos do ano foi sugerida por Goodwin & Greenhall (1961) e por Alvarez & Ramirez-Pulido (1972), que registraram colônias compostas somente por machos em cavernas na América Central (México e em Trinidad e Tobago). O comportamento de segregação sexual também foi observado em colônias do Brasil (Baumgarten & Vieira, 1994; Farias *et al.* 2018) e do México (Galindo-Galindo *et al.*, 2000).

Em relação à utilização de abrigos, de forma geral *A. geoffroyi* pode ser considerada comum em cavernas, podendo formar colônias de dezenas e até centenas de indivíduos (Almeida *et al.*, 2002; Bredt *et al.*, 1999; Trajano, 1985). Segundo a classificação proposta por Guimarães & Ferreira (2014), *A. geoffroyi* é uma espécie considerada essencialmente cavernícola, ou seja, espécies que se abrigam majoritariamente neste tipo de ambiente.

Todavia, ao analisarmos estudos que contemplam a ocorrência de *A. geoffroyi* em cavernas, observa-se que sua ocorrência não é tão frequente quanto se tem atribuído. Após estudos realizados em 39 cavernas no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) em São Paulo, Trajano (1985) afirmou que *A. geoffroyi* parece ser uma espécie comum, mas de distribuição muito restrita, já que ela foi amostrada em apenas uma caverna (Calcáreo Branco) em sua área de estudo. Situação semelhante foi observada em outros inventários realizados em dezenas de cavernas brasileiras em diferentes regiões do país (Bredt *et al.*, 1999; Esbérard *et al.*, 2005; Martins, 2015; Portella, 2010). Torquetti e colaboradores (2017) durante o monitoramento de 66 cavidades durante 18 meses em uma área cárstica de Minas Gerais não relataram nenhuma ocorrência para a espécie. Estes dados corroboram com Moratelli & Peracchi (2007), Arnone (2008) e Rocha (2015), que classificaram a ocorrência da espécie como rara, e com Bredt *et al.* (1999), que afirmam que, apesar de abundantes, suas colônias são pouco frequentes.

The most specific studies carried out in Brazil were conducted by Baumgarten & Vieira (1994), by Zortéa (2003) and Farias et al. (2018) and are related to the reproduction, development and feeding habits of the species. The existence of sexually segregated colonies of A. geoffroyi during certain times of the year was suggested by Goodwin & Greenhall (1961) and by Alvarez & Ramirez-Pulido (1972) who recorded colonies composed only of males in caves in Central America (Mexico and in Trinidad and Tobago). Sexual segregation behavior has also been observed in colonies in Brazil (Baumgarten & Vieira, 1994; Farias et al. 2018) and Mexico (Galindo-Galindo et al., 2000).

Regarding the use of shelters, A. geoffroyi can be considered common in caves, and can form colonies of tens and even hundreds of individuals (Almeida et al., 2002; Bredt et al., 1999; Trajano, 1985). According to the classification proposed by Guimarães & Ferreira (2014), A. geoffroyi is a species considered essentially cave-dwelling, i.e., species that take shelter mostly in this type of environment.

Nevertheless, when we analyze studies that contemplate the occurrence of A. geoffroyi in caves, it is observed that its occurrence is not as frequent as has been attributed. After studies conducted in 39 caves in the Alto Ribeira Tourist State Park (Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira - PETAR) in São Paulo, Trajano (1985) stated that A. geoffroyi seems to be a common species, but with a very restricted distribution, since it was sampled in only one cave (Calcáreo Branco) in his study area. A similar situation was observed in other inventories conducted in dozens of Brazilian caves in different regions of the country (Bredt et al., 1999; Esbérard et al., 2005; Martins, 2015; Portella, 2010). Torquetti and collaborators (2017) during the monitoring of 66 cavities for 18 months in a karst area of Minas Gerais reported no occurrence of the species. These data corroborate with Moratelli & Peracchi (2007), Arnone (2008) and Rocha (2015) who classified the occurrence of the species as rare and with Bredt et al. (1999) who state that despite abundant its colonies are infrequent.

Entretanto, apesar da espécie apresentar distribuição restrita a algumas cavernas o tamanho elevado de algumas colônias parece ser recorrente. As maiores colônias de *A. geoffroyi* registradas e contabilizadas por meio de estimativas visuais foram encontradas em cavernas no México com 170 a 300 indivíduos (Galindo-Galindo et al., 2000). Trajano (1985) e Heideman et al. (1992) estimaram colônias compostas por milhares de exemplares em cavernas do Brasil e Trinidad e Tobago respectivamente. Entretanto, em nenhum dos estudos foi realizado um censo sistemático sobre o tamanho destas populações.

Estudos que contemplem o método de captura, marcação e recaptura de morcegos em abrigos são pouco comuns no Brasil, sendo esta técnica utilizada em grande parte para entender fatores como deslocamento (entre ilhas, cavernas e fragmentos florestais), fidelidade ao abrigo e variação nas taxas de infestação por ectoparasitas (Barros et al., 2006; Bernard & Fenton, 2003, Bianconi et al., 2006, Lourenço, 2011, Oliveira, 2010, Trajano, 1996, Reis et al., 2019, Reis et al., 2021). Até o momento, poucos estudos foram realizados com o intuito de se realizar estimativas dos tamanhos populacionais, sendo a maioria dos trabalhos voltados para o estudo da área de vida dos morcegos (Arnone, 2008; Leite, 2008; Campanhã & Fowler 1995; Trajano, 1996).

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar aspectos da ecologia populacional (estimativas populacionais, razão sexual e segregação sexual) de duas colônias de *A. geoffroyi* associadas a cavernas do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais ao longo de um ciclo anual. Desta forma, espera-se fornecer subsídios que auxiliem na proposição de medidas de conservação da espécie e de seus abrigos, tendo em vista o seu importante papel ecossistêmico e as ameaças efetivas as cavernas utilizadas como abrigos frente às implantação de empreendimentos potencialmente poluidores e que possam resultar na supressão destes ecossistemas.

*Although the species has a restricted distribution to a few caves, the large size of some colonies seems to be recurrent. The largest colonies of *A. geoffroyi* recorded and counted by visual estimates were found in caves in Mexico with 170 to 300 individuals (Galindo-Galindo et al., 2000). Trajano (1985) and Heideman et al. (1992) estimated colonies consisting of thousands of specimens in caves in Brazil and Trinidad and Tobago respectively. However, in neither study was a systematic census of the size of these populations conducted.*

Studies that address the capture, marking, and recapture method of bats in shelters are uncommon in Brazil. This technique is largely used to understand factors such as displacement (between islands, caves, and forest fragments), fidelity to the shelter, and variation in ectoparasite infestation rates (Barros et al., 2006; Bernard & Fenton, 2003, Bianconi et al., 2006, Lourenço, 2011, Oliveira, 2010, Trajano, 1996, Reis et al., 2019, Reis et al., 2021). To date, few studies have been conducted in order to perform estimates of population sizes, with most of the work focused on the study of the life area range of bats (Arnone, 2008; Leite, 2008; Campanhã & Fowler 1995; Trajano, 1996).

*In this context, this study aimed to evaluate aspects of the population ecology (population estimates, sex ratio and sex segregation) of two colonies of *A. geoffroyi* associated with caves in the Iron Quadrangle in Minas Gerais throughout an annual cycle. Therefore, it is the goal to provide subsidies to assist in proposing measures for the conservation of the species and its shelters, given its important ecosystem role and the effective threats to the caves used as shelters against the implementation of enterprises that may result in the suppression of these ecosystems.*

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Este estudo foi realizado com duas populações de *A. geoffroyi* que utilizam cavernas como abrigo diurno. Uma das cavernas encontra-se localizada no município de Caeté (Loca dos Morcegos) e a outra no município de Brumadinho (Caverna MJ-05), ambas no estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

A caverna Loca dos Morcegos (19°48'51"S, 43°41'12"W; 1.220 m de altitude) está localizada na Serra da Piedade na região norte do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2). A região possui fitofisionomia típica de Mata Atlântica nas regiões de menor altitude, campos rupestres no topo e manchas de cerrado no entorno (Bueno 1992). Já a caverna MJ-05 (20°5'40"S, 44°4' 36"W; 1.072 m de altitude) está localizada na Serra da Moeda, dentro da região metropolitana de Belo Horizonte, a 50 km de Loca dos Morcegos (Figura 3). A região é dominada por Mata Atlântica com ocorrência de florestas estacionais semidecíduais, além de campos altimontanos e campos rupestres típicos do bioma Cerrado (Markus, 2003). De acordo com Koppen (1948), o clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa) (tropical de altitude), com invernos secos e frios a partir de abril a setembro e verões quentes e chuvosos de outubro a março.

Ambas as cavernas apresentam semelhantes condições morfológicas sendo compostas por um conduto retilíneo com duas entradas, possuem drenagem interna e estão localizadas em áreas de densa vegetação florestal (Figuras 2 e 3). É importante salientar que ambas as cavernas estão localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero, que é uma das mais importantes jazidas de ferro do país e, conseqüentemente, uma região de intensa atividade mineradora. Esta região corresponde a uma das maiores jazidas de minério de ferro do Brasil com reservas da ordem de 29 bilhões de toneladas e aproximadamente 46 mineradoras em operação atualmente (Souza & Carmo, 2015). Assim, a exploração mineral na região e a supressão de cavernas no contexto do licenciamento representa uma contínua ameaça à conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos relacionados a quiropterofauna.

MATERIALS AND METHODS

Study area

This study was conducted with two populations of A. geoffroyi that use caves as diurnal shelter. One of the caves is located in the municipality of Caeté (Loca dos Morcegos) and the other in the municipality of Brumadinho (MJ-05 Cave), both in the state of Minas Gerais, Brazil (Figure 1).

Loca dos Morcegos cave (19°48'51"S, 43°41'12"W; 1,220 m altitude) is located in Serra da Piedade in the northern region of the Iron Quadrangle (Figure 2). The region has typical Atlantic Forest physiognomy in the lower altitude regions, campo rupestre on top and patches of cerrado (savanna) in the surrounding area (Bueno 1992). MJ-05 cave (20°5'40"S, 44°4' 36"W; 1,072 m altitude) is located in Serra da Moeda within the metropolitan region of Belo Horizonte 50 km from Loca dos Morcegos (Figure 3). The region is dominated by Atlantic Forest with occurrence of semideciduous seasonal forests, as well as altitude fields and campo rupestre typical of the Cerrado biome (Markus, 2003). According to Koppen (1948), the region's climate is characterized as humid mesothermal (Cwa) (high altitude tropical), with dry and cold winters from April to September and hot and rainy summers from October to March.

Both caves present similar morphological conditions being composed of a rectilinear conduit with two entrances, have internal drainage and are located in areas of dense forest vegetation (Figures 2 and 3). It is important to point out that both caves are located in the Iron Quadrangle region, which is one of the most important iron deposits in the country and, consequently, a region of intense mining activity. This region corresponds to one of the largest iron ore deposits in Brazil with reserves of around 29 billion tons and approximately 46 mining companies currently in operation (Souza and Carmo 2015). Therefore, mineral exploration in the region and the suppression of caves in the context of licensing represents a continuous threat to the conservation of biodiversity and ecosystem services related to chiroptera fauna.

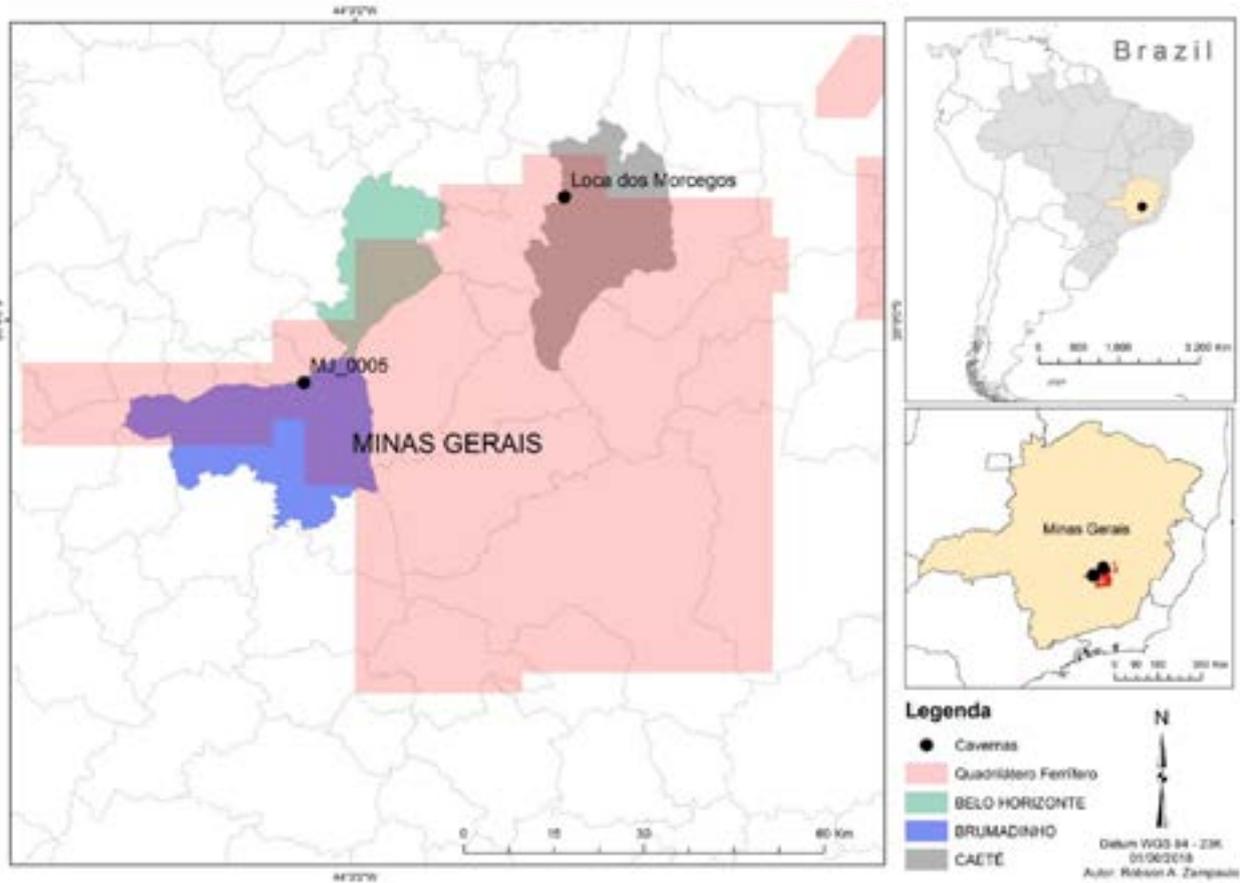


Figura 1 – Mapa de localização das cavernas onde se encontram as populações estudadas de *A. geoffroyi* no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, Brasil.

Figure 1 – Caves location map where the studied populations of *A. geoffroyi* are found in the Iron Quadrangle, Minas Gerais State, Brazil.



Figura 2 – Aspecto geral da caverna Local dos Morcegos. A) Área de entorno; B) Entrada a montante; C) Entrada jusante; D) Uma das inúmeras agregações de *A. geoffroyi* observadas no interior da caverna.

Figure 2 – General aspect of Local dos Morcegos cave. A) Surrounding area; B) Upstream entrance; C) Downstream entrance; D) One of the numerous aggregations of *A. geoffroyi* observed inside the cave.

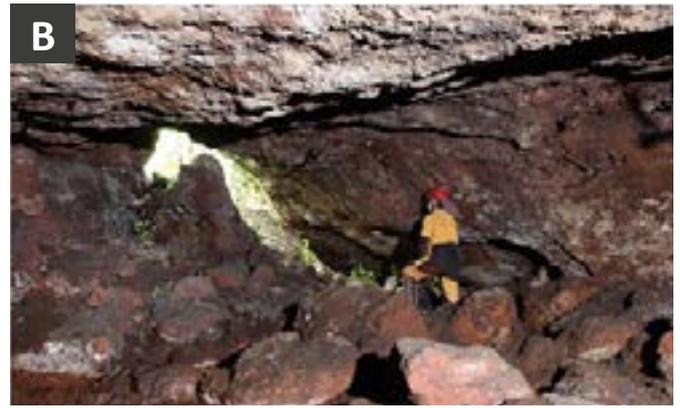


Figura 3 – Caverna MJ-05. A) Aspecto geral da paisagem externa com um barramento artificial a jusante da caverna; B) Vista da entrada a montante; C) Vista interna da entrada a jusante com guano recobrendo as rochas do primeiro plano da imagem; D) Uma das inúmeras agregações de *A. geoffroyi* observadas no interior da caverna.

Figure 3 – MJ-05 Cave. A) General aspect of the external landscape with an artificial dam downstream of the cave; B) View of the upstream entrance; C) Internal view of the downstream entrance with guano covering the rocks in the foreground of the image; D) One of the numerous aggregations of *A. geoffroyi* observed inside the cave.

Marcação dos morcegos e coleta de dados

Durante 13 meses, foram realizadas visitas mensais, com duração de um dia cada, às duas cavernas, sendo as amostragens realizadas durante o período diurno. As amostragens na caverna MJ-05 ocorreram entre os meses de março de 2017 a março de 2018, enquanto as amostragens na Loca dos Morcegos ocorreram entre os meses de maio de 2017 a maio 2018. Em cada mês foram amostrados aproximadamente 60 exemplares em cada caverna com o intuito de mantermos uma homogeneidade entre as amostragens. Durante as sessões foram realizadas capturas dos morcegos com o auxílio de puçá com haste retrátil de 2m de comprimento. Em cada ocasião, o coletor se posicionava sempre em um ponto central da caverna, próximo à colônia, e realizava a captura dos indivíduos, priorizando os pontos de maior concentração.

Bats marking and data collection

Over a period of 13 months, monthly visits lasting one day each were made to the two caves, with sampling conducted during daytime hours. Sampling in MJ-05 cave occurred between the months of March 2017 and March 2018, while sampling in Loca dos Morcegos occurred between the months of May 2017 and May 2018. In each month, approximately 60 specimens were sampled in each cave in order to maintain homogeneity between samplings. During the sessions, bats were captured using a capturing net with a 2m-long retractable rod. On each occasion, the collector always positioned himself in a central point of the cave, near the colony, and captured the individuals, prioritizing the points of greatest concentration.

Os indivíduos capturados eram acondicionados em sacos de pano para contenção, transportados para o lado de fora das cavernas, examinados e medidos. Foram realizadas mensurações do antebraço direito com paquímetro (em milímetros), obtenção da massa corporal com dinamômetro portátil (em gramas), avaliação da idade por meio de observação de ossificação ou não da epífise falangeana do dedo três e avaliação da condição reprodutiva de cada indivíduo (Anthony, 1988). Foram considerados reprodutivos os machos com testículos escrotados e as fêmeas com gravidez evidente, verificada por palpação abdominal ou com sinais de lactação.

Em ambas as cavernas, os indivíduos foram marcados com anilhas adaptadas ao antebraço direito ou suspensas em colares. As anilhas apresentavam sequência numérica contínua, antecedida pelas iniciais AR para permitir a identificação do indivíduo em caso de recaptura. O peso total das anilhas e colares (0,09g) não ultrapassava 0,6% da média da massa corporal dos morcegos.

Após a coleta dos dados, os morcegos foram liberados dentro das cavernas, salvo dois espécimes retirados como material testemunho, os quais foram depositados na coleção de referência do mestrado em Biologia de Vertebrados da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) (MZ694 até MZ699). Todos os procedimentos realizados durante este trabalho contaram com a aprovação da Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) da PUC-Minas (#019/2016) e autorização de captura, coleta e transporte para atividades com finalidade científica (#55700/2), emitida pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (Sisbio/ICMBio).

Análises dos dados

Para análise dos dados morfométricos, todas as amostras foram testadas quanto a sua normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Amostras com valor de (p) superior a 0,05 foram consideradas normais. Sempre que comprovada a normalidade da amostra utilizamos teste t de

The captured individuals were placed in cloth bags for containment, transported outside the caves, examined and measured. The right forearm was measured with a caliper (in millimeters), body mass was obtained with a portable dynamometer (in grams), age was assessed by observing whether the phalangeal epiphysis of the third finger was ossified or not, and the reproductive status of each individual was evaluated (Anthony, 1988). Males with scrotum testis and females with evident pregnancy, verified by abdominal palpation, or with signs of lactation were considered reproductive.

In both caves, individuals were marked with rings attached to the right forearm or suspended from collars. The rings had a continuous number sequence, preceded by the initials AR to allow identification of the individual in case of recapture. The total weight of the rings and collars (0.09g) did not exceed 0.6% of the average body mass of the bats.

After data collection, the bats were released inside the caves, except for two specimens removed as testimonial material, which were deposited in the reference collection of the master's degree program in Vertebrate Biology at the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC-Minas) (MZ694 to MZ699). All procedures performed during this work had the approval of the Ethics Committee on Animal Use (CEUA) of PUC-Minas (#019/2016) and authorization for capture, collection and transport for activities with scientific purposes (#55700/2) issued by the Biodiversity Authorization and Information System of the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (Sisbio/ICMBio).

Data Analysis

For analysis of the morphometric data, all samples were tested for normality using the Shapiro-Wilk test. Samples with a (p) value greater than 0.05 were considered normal. Whenever the normality of the sample was proven, Student's t test was used to analyze the samples. On the other hand, when the data were not normal, the Wilcoxon test (non-parametric) was used. These tests were used to: i)

Student para analisar as amostras, em contrapartida, quando os dados não apresentaram normalidade, foi realizado o teste de Wilcoxon (não paramétrico). Estes testes foram utilizados para: i) avaliar diferenças no comprimento do antebraço entre os sexos e entre as populações. Neste caso, foram desconsiderados indivíduos jovens, subadultos e dados de recaptura; ii) avaliar se há diferença entre o peso em relação ao sexo e entre as duas populações - para estas análises as fêmeas prenhes e com filhotes foram desconsideradas, assim como as recapturas. O processamento das análises foi realizado no software Statistica, versão 7.0 (Statsoft., 2004), considerando nível de significância de 5%. Por sua vez, a razão sexual entre machos e fêmeas foi obtida pela divisão do número de fêmeas pelo número de machos.

O tamanho das populações em cada caverna foi estimado utilizando o método de captura, marcação e recaptura. Recapturas realizadas no mesmo dia da marcação não foram consideradas. Os métodos de estimativas populacionais utilizam informações sobre o número de animais marcados e sua proporção em amostras subsequentes para estimar a abundância (Seber, 1982). Sendo assim, o método de Jolly-Seber foi utilizado para realizar estimativa do tamanho populacional em cada evento de amostragem (mensal) de cada uma das colônias estudadas. Para análise, as colônias foram consideradas como populações abertas, ou seja, com ocorrência de mortalidade, natalidade, imigração e emigração (Krebs, 1999). A utilização desta metodologia é condicionada aos seguintes pressupostos: 1 - Todo indivíduo tem a mesma probabilidade de ser capturado em qualquer amostra, esteja marcado ou não; 2 - Todo indivíduo marcado tem a mesma probabilidade de sobrevivência nos intervalos entre as amostras; 3 - Indivíduos não perdem suas marcas e não se pode deixar de encontrar essas marcas em nenhuma captura; 4 - A duração do evento de captura é insignificante em relação aos intervalos entre eventos (Seber, 1982). Assim, as taxas mensais de recaptura de cada população foram obtidas utilizando o número de indivíduos recapturados em cada mês, multiplicado por 100 e dividido pelo número de indivíduos capturados no mês.

evaluate differences in forearm length between genders and between populations. In this case, young individuals, sub-adults, and recapture data were disregarded; ii) to evaluate if there was a weight difference in relation to sex and between the two populations. For these analyses, pregnant females and females with young pups were disregarded, as well as recaptures. The processing of the analyses was done in Statistica software, version 7.0 (Statsoft., 2004) considering a significance level of 5%. The sex ratio between males and females was obtained by dividing the number of females by the number of males.

The size of the populations in each cave was estimated using the capture, tagging, and recapture method. Recaptures made on the same day as tagging were not considered. Population estimation methods use information on the number of tagged animals and their proportion in subsequent samples to estimate abundance (Seber, 1982). Therefore, the Jolly-Seber method was used to estimate the population size at each sampling event (monthly) for each of the colonies studied. For the analysis, the colonies were considered as open populations, i.e., with occurrence of mortality, birth, immigration and emigration (Krebs, 1999). The use of this methodology is conditioned to the following assumptions: 1 - Every individual has the same probability of being captured in any sample, whether marked or not; 2 - Every marked individual has the same probability of survival in the intervals between samples; 3 - Individuals do not lose their marks and these marks cannot be missed in any capture; 4 - The duration of the capture event is insignificant in relation to the intervals between events (Seber, 1982). Thus, monthly recapture rates for each population were obtained using the number of individuals recaptured each month, multiplied by 100 and divided by the number of individuals captured in the month.

RESULTADOS

Biometria e segregação sexual

Ao todo, foram capturados e marcados 1.189 indivíduos em ambas as colônias, dos quais 655 eram machos e 534 fêmeas. Na caverna MJ-05, foram marcados 380 machos e 236 fêmeas e na Loca dos Morcegos, 275 machos e 298 fêmeas. Ambas as cavernas apresentaram a mesma variação em relação à proporção sexual ao longo do ano. Na primeira metade do ano (janeiro e junho), as populações eram compostas majoritariamente por indivíduos machos adultos. Durante o mês de junho (MJ-05) e julho (Loca dos Morcegos), ocorreu a chegada das fêmeas aos abrigos, atingindo uma razão sexual de aproximadamente 1:1 em julho e havendo a predominância de fêmeas até outubro na caverna MJ-05 e até dezembro na Loca dos Morcegos (Tabela 1). Este momento corresponde ao período reprodutivo (cópulas e gestação) mais intenso das populações. Fêmeas prenhes começaram a ser observadas nas populações no fim de setembro na Loca dos Morcegos e fim de novembro na caverna MJ-05.

RESULTS

Biometry and sex segregation

A total of 1,189 individuals were captured and marked in both colonies, of which 655 were males and 534 were females. In MJ-05, 380 males and 236 females were marked, and in Loca dos Morcegos, 275 males and 298 females. Both caves showed the same variation in sex ratio throughout the year. In the first half of the year (January and June) the populations were mostly composed of adult males. During June (MJ-05) and July (Loca dos Morcegos) the females arrival to the shelters occurred, reaching a sex ratio of approximately 1:1 in July, with females predominating until October in MJ-05 and December in Loca dos Morcegos (Table 1). This moment corresponds to the most intense reproductive period (copulations and gestation) of the populations. Pregnant females started to be observed in the populations at the end of September in Loca dos Morcegos and at the end of November in MJ-05.

Tabela 1 - Proporção de machos e fêmeas das populações estudadas.

MESES	MJ-05 RAZÃO SEXUAL (M:F)	LOCA DOS MORCEGOS RAZÃO SEXUAL (M:F)
março	1 : 0,06	-
abril	1 : 0,08	-
maio	1 : 0,20	1 : 0,00
junho	1 : 0,86	1 : 0,17
julho	1 : 0,93	1 : 1,07
agosto	1 : 1,56	1 : 2,14
setembro	1 : 1,50	1 : 1,43
outubro	1 : 1,77	1 : 3,50
novembro	1 : 0,79	1 : 5,20
dezembro	1 : 0,36	1 : 1,73
janeiro	1 : 0,20	1 : 0,19
fevereiro	1 : 0,18	1 : 0,16
março	-	1 : 0,47
abril	-	1 : 0,52

Table 1 - Males and females ratio of the studied populations.

MONTHS	MJ-05 SEX RATIO (M:F)	LOCA DOS MORCEGOS SEX RATIO (M:F)
march	1 : 0,06	-
april	1 : 0,08	-
may	1 : 0,20	1 : 0,00
june	1 : 0,86	1 : 0,17
july	1 : 0,93	1 : 1,07
august	1 : 1,56	1 : 2,14
september	1 : 1,50	1 : 1,43
october	1 : 1,77	1 : 3,50
november	1 : 0,79	1 : 5,20
december	1 : 0,36	1 : 1,73
january	1 : 0,20	1 : 0,19
february	1 : 0,18	1 : 0,16
march	-	1 : 0,47
april	-	1 : 0,52

A partir de novembro, na caverna MJ-05, e de janeiro na Loca dos Morcegos, as fêmeas abandonam as cavernas em busca de outros abrigos para a conclusão da gestação e nascimento dos filhotes (Figura 4 A-B), resultando novamente no predomínio de machos nas duas populações, estabelecendo, portanto, claramente um padrão de segregação sexual neste período. Curiosamente, no entanto, no mês de maio de 2018 na Loca dos Morcegos, os machos também abandonaram o abrigo, o que demonstra o uso extremamente dinâmico deste abrigo pela espécie. Ensaio de caracterização quanto à motilidade

From November in MJ-05 cave and January in Loca dos Morcegos, females leave the caves in search of other shelters for the completion of gestation and birth of the young (Figure 4 A-B). This results again in the predominance of males in both populations, clearly establishing a pattern of sexual segregation in this period. However, in May 2018 at Loca dos Morcegos, males also abandoned the cave, demonstrating the extremely dynamic use of this shelter by the species.

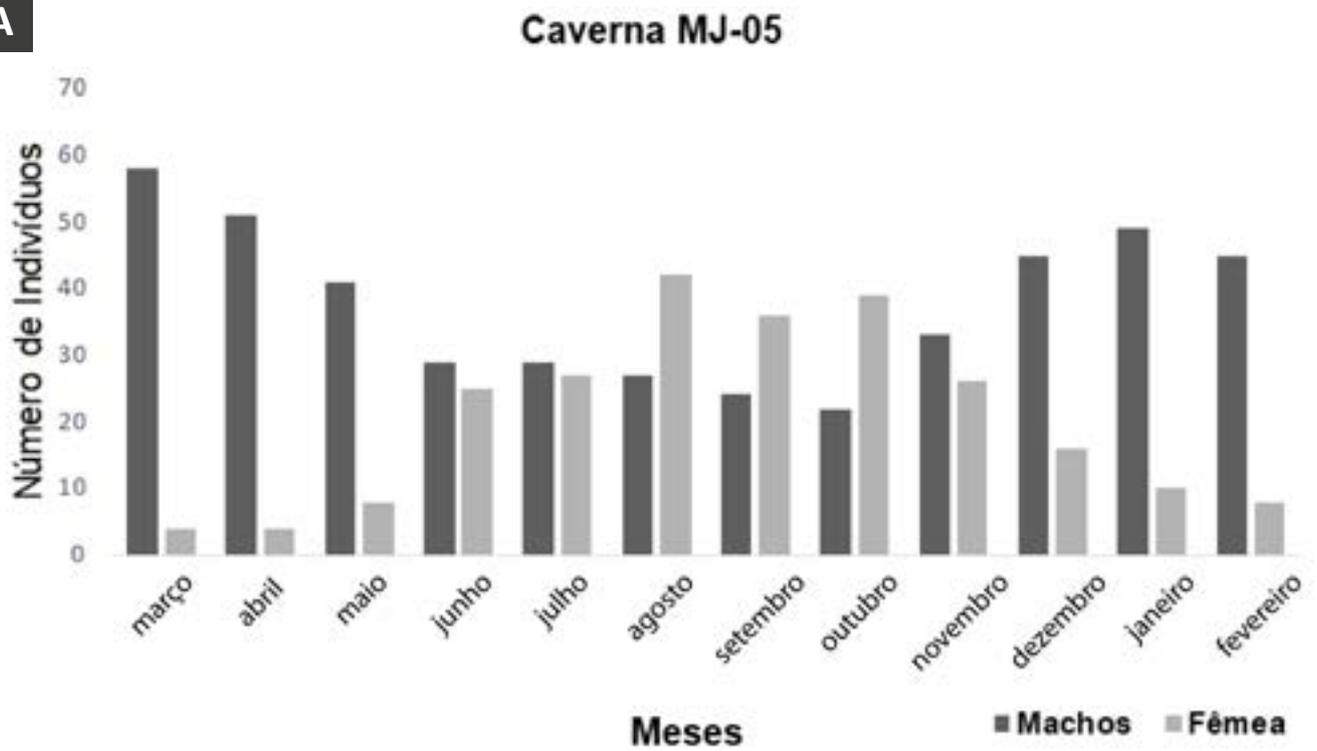
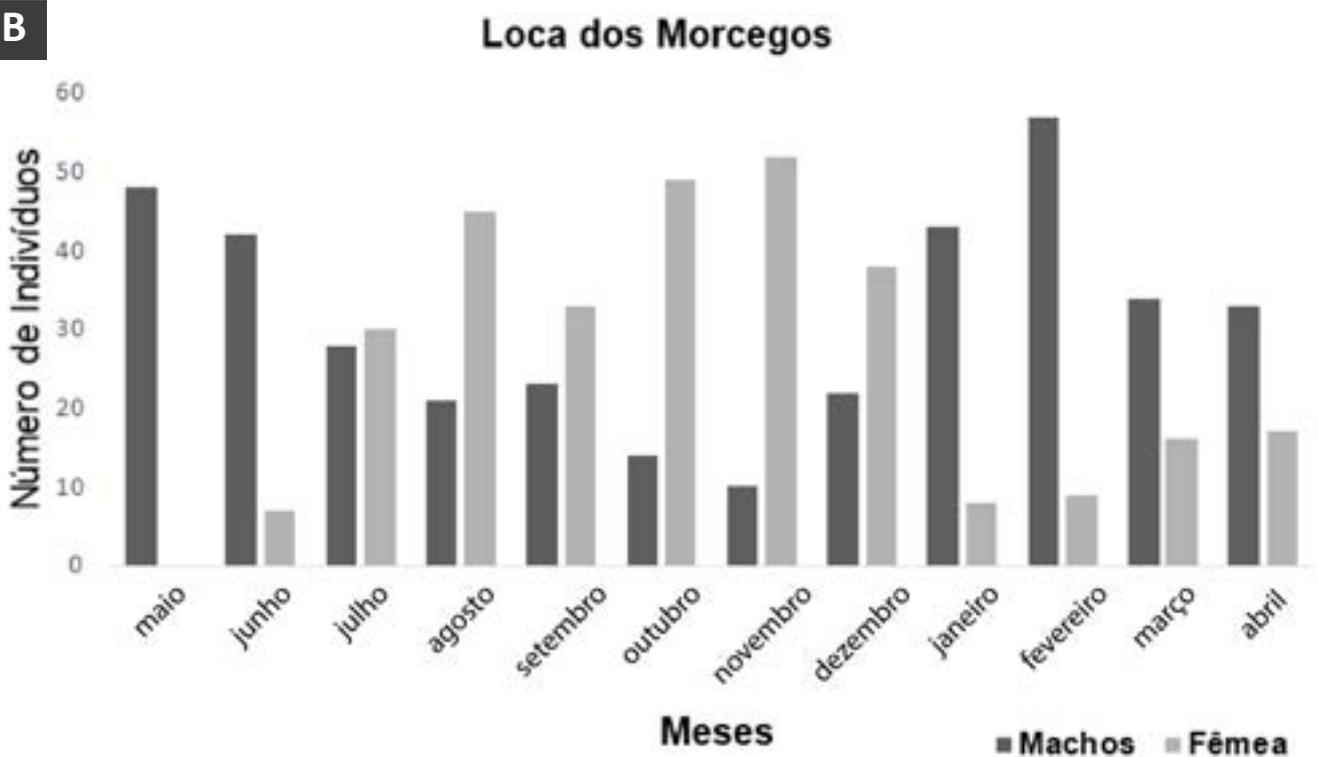
A**B**

Figura 4 – Abundância de machos e fêmeas de *A. geoffroyi* registrados na caverna MJ-05 (A) e na caverna Loca dos Morcegos (B).

Figure 4 – Males and females abundance of *A. geoffroyi* recorded in MJ-05 cave (A) and Loca dos Morcegos cave (B).

Em relação à biometria dos morcegos, o peso médio da população da Loca dos Morcegos (N = 541) apresentou-se significativamente maior (15,2g ± 1,4) que o da população da MJ-05 (N = 543) (14,9g ± 1,9) (W = 80686, p = 0,01). Porém, quando analisada a variável do tamanho do antebraço, não foram observadas variações significativas entre as populações (42,1mm ± 1,1 - MJ-05 e 42,2mm ± 1,1 - Loca dos Morcegos; W = 139570, p = 0,15). Por sua vez, a média de tamanho do antebraço das fêmeas adultas (N = 222) foi de 42,2mm (± 1,2), enquanto nos machos adultos (N = 321) foi de 41,9mm (± 1,1) na MJ-05. As fêmeas adultas da Loca dos Morcegos (N = 291) apresentaram antebraço de 42,2mm (± 1,1), já os machos (N = 250) apresentaram média de antebraço de 42,1mm (± 1,1). Desta forma, fêmeas apresentaram antebraço significativamente maior que os dos machos na cavidade MJ-05 (W = 38786, p = 0,003). O mesmo resultado não foi observado para a população da Loca dos Morcegos (t = -1,09, p = 0,27). Em ambas as populações, não foram observadas diferenças significativas quando comparamos o peso em função do sexo dos indivíduos (W = 21565, p = 0,07 para a Loca dos Morcegos e W = 18764, p = 0,37 para a MJ-05). Sendo assim, os dados biométricos observados para ambas as populações são compatíveis com o observado para a espécie na literatura (Reis, 2017)

Estimativa populacional e variação anual

As taxas de recapturas foram similares em ambas as colônias, com 616 indivíduos capturados na caverna MJ-05 e 102 recapturas (16,5%) e, 573 indivíduos capturados na Loca dos Morcegos e 106 recapturas (18,4%). As maiores taxas de recaptura foram observadas, em ambas as cavernas, no mês de março de 2018, sendo 42% na Loca dos Morcegos e 32% na MJ-05 (Figura 5). Este é o período em que as populações estão menores e há o predomínio de machos nas colônias. Já as menores taxas de recaptura ocorreram em julho na Loca dos Morcegos e em agosto na cavidade MJ-05 ambas com 3% de recapturas (Figura 5). Este corresponde ao período em que as fêmeas já ocuparam as cavernas.

In relation to bat biometry, the mean weight of the Loca dos Morcegos population (N = 541) was significantly greater (15.2g ± 1.4) than that of the MJ-05 population (N = 543) (14.9g ± 1.9) (W = 80686, p = 0.01). However, when the forearm size variable was analyzed, no significant variations were observed between populations (42.1mm ± 1.1 - MJ-05 and 42.2mm ± 1.1 - Loca dos Morcegos; W = 139570, p = 0.15). In turn, the mean forearm size of adult females (N = 222) was 42.2mm (± 1.2), while in adult males (N = 321) it was 41.9mm (± 1.1) at MJ-05. Adult females from Loca dos Morcegos (N = 291) had forearms of 42.2mm (± 1.1), while males (N = 250) had mean forearms of 42.1mm (± 1.1). Thus, females showed significantly larger forearms than males in the MJ-05 cavity (W = 38786, p = 0.003). The same result was not observed for the Loca dos Morcegos population (t = -1.09, p = 0.27). In both populations, no significant differences were observed when weight was compared by sex (W = 21565, p = 0.07 for Loca dos Morcegos and W = 18764, p = 0.37 for MJ-05). Therefore, the biometric data observed for both populations are compatible with that observed for the species in the literature (Reis, 2017).

Population estimate and annual variation

Recapture rates were similar in both colonies, with 616 individuals captured in MJ-05 cave and 102 recaptures (16.5%) and, 573 individuals captured in Loca dos Morcegos and 106 recaptures (18.4%). The highest recapture rates were observed, in both caves, in the month of March 2018, being 42% in Loca dos Morcegos and 32% in MJ-05 (Figure 5). This is the period when populations are lower and there is a predominance of males in the colonies. The lowest recapture rates occurred in July in Loca dos Morcegos and in August in MJ-05, both with 3% recaptures (Figure 5). This corresponds to the period when females have already occupied the caves.

Taxa de recaptura por caverna (%)

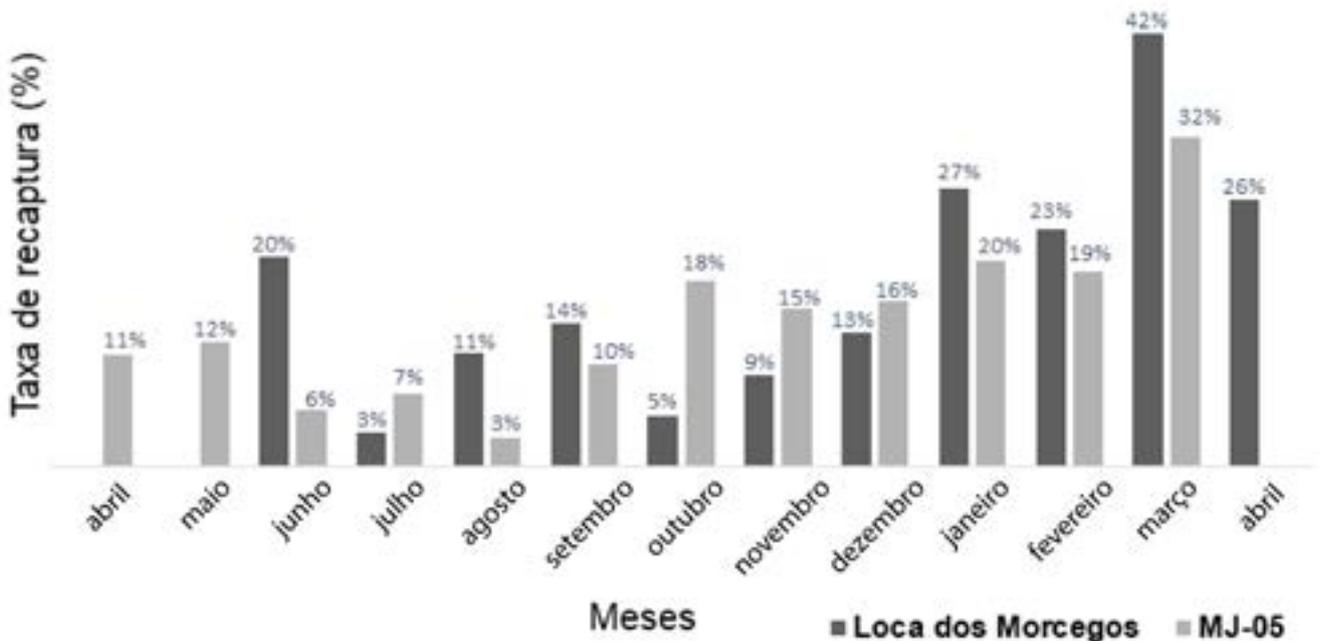


Figura 5 – Taxa de recaptura mensal de *A. geoffroyi* na caverna Loca dos Morcegos e na caverna MJ-05.

Figure 5 – Monthly recapture rate of *A. geoffroyi* in Loca dos Morcegos cave and MJ-05 cave.

Considerando as estimativas populacionais obtidas pelo método de Jolly-Seber, observamos que o tamanho de ambas as colônias variou significativamente ao longo do ano. Os maiores valores populacionais foram estimados para o mês de agosto com 11.730 indivíduos na caverna MJ-05 e, em outubro, na Loca dos Morcegos, com 7.027 indivíduos. Estes picos populacionais estão associados aos meses em que foram observadas as menores taxas de recaptura. Já os menores tamanhos populacionais foram observados em abril, na caverna MJ-05 (903 indivíduos), e em junho, na Loca dos Morcegos (466 indivíduos) (Figura 6). A média anual observada foi de 3.653 exemplares na MJ-05 (± 1.463) e 2.959 (± 1.484) indivíduos na Loca dos Morcegos.

Considering the population estimates obtained by the Jolly-Seber method, it was observed that the size of both colonies varied significantly throughout the year. The highest population values were estimated for the month of August with 11,730 individuals in MJ-05 cave, and for October in Loca dos Morcegos, with 7,027 individuals. These population peaks are associated with the months in which the lowest recapture rates were observed. The smallest population sizes were observed in April in MJ-05 (903 individuals) and in June in Loca dos Morcegos (466 individuals) (Figure 6). The observed annual average was 3,653 individuals in MJ-05 ($\pm 1,463$) and 2,959 ($\pm 1,484$) individuals in Loca dos Morcegos.

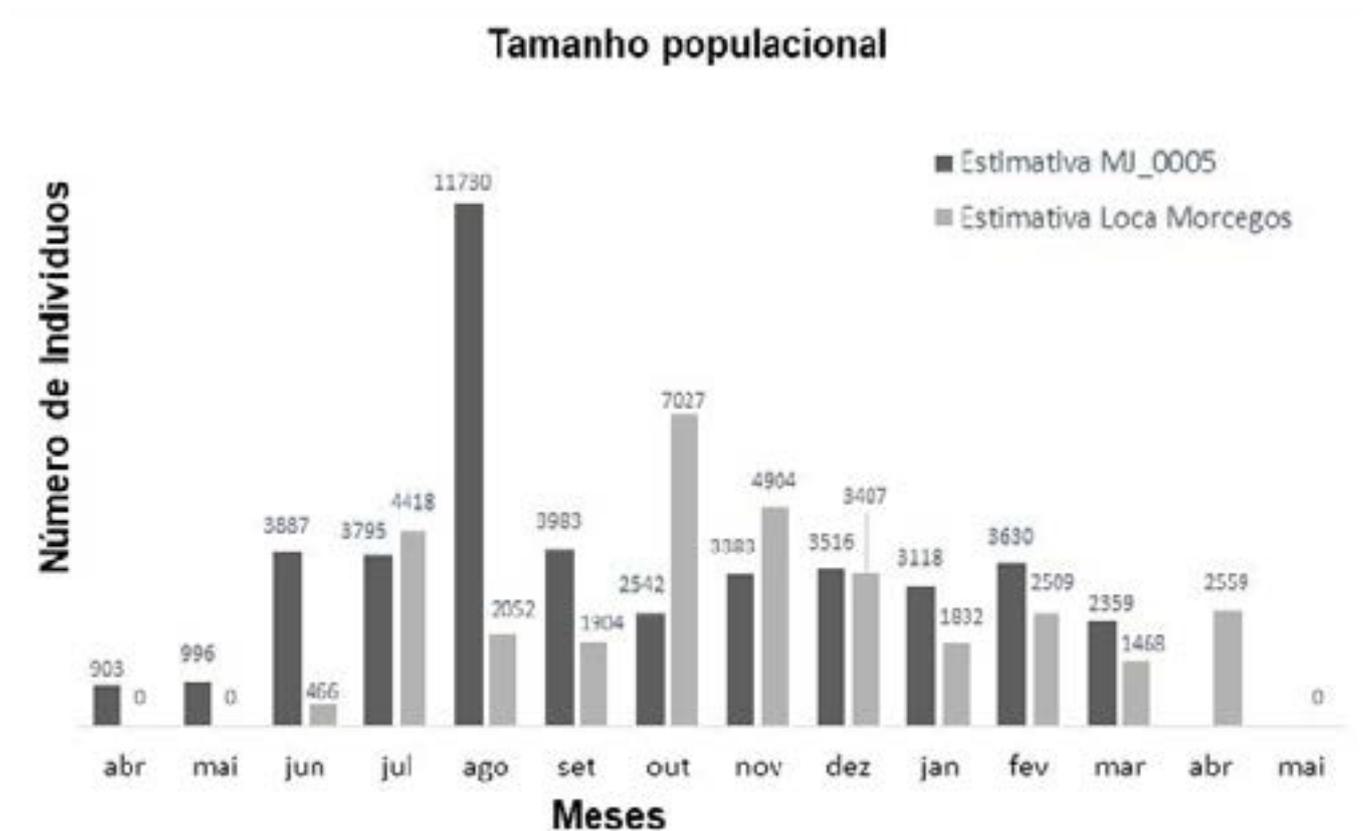


Figura 6 – Estimativa do tamanho populacional (Jolly-Seber) e sua variação anual em duas populações de *A. geoffroyi*, na caverna Loca dos Morcegos e na caverna MJ-05.

Figure 6 – *Loca dos Morcegos* cave and MJ-05 cave *A. geoffroyi* population size estimation (Jolly-Seber) and its annual variation.

DISCUSSÃO

Segregação sexual

O comportamento de segregação sexual para *A. geoffroyi* já foi relatado por Galindo-Galindo *et al.* (2000) em caverna do México. Neste caso, os autores observaram o abandono do abrigo maternidade pelos machos após o período de cópula. Comportamento semelhante foi observado por Baumgarten & Vieira (1994), que afirmam que a proporção de machos adultos diminuiu quando as fêmeas estavam grávidas ou carregando filhotes. Goodwin & Greenhal (1961) relatam em seus estudos a variação da proporção sexual ao longo do ano e a predominância de fêmeas prenhes sobre os machos, no mês de novembro.

De forma geral, nossos resultados demonstram um padrão diferente de segregação sexual dos demais estudos, com a saída das fêmeas ainda prenhes e a permanência dos machos no abrigo. Além disso, na Loca dos Morcegos, após o acasa-

DISCUSSION

Sexual segregation

Sexual segregation behavior for A. geoffroyi has already been reported by Galindo-Galindo et al. (2000) in a Mexican cave. In this case, the authors observed the abandonment of the maternity shelter by males after copulation period. Similar behavior was observed by Baumgarten & Vieira (1994) who state that the proportion of adult males decreased when females were pregnant or carrying young. Goodwin & Greenhal (1961) reported in their studies the variation of sex ratio throughout the year and the predominance of pregnant females over males in the month of November.

In general, our results show a different pattern of sexual segregation than in other studies, with pregnant females leaving and males remaining in the shelter. Moreover, in Loca dos Morcegos, females leave the cave after mating between

lamento, as fêmeas saem da caverna entre janeiro e abril e, posteriormente, os machos aparentemente também abandonam o abrigo, resultando em um padrão muito diferente de todos os descritos até o momento. Nas colônias estudadas, os abrigos para onde vão as fêmeas são desconhecidos, até o momento, e acreditamos que elas possam ocupar outros abrigos, formando grandes colônias maternidade ou se dividindo em grupos pequenos. Destas, talvez a segunda hipótese seja a mais plausível uma vez que, apesar de milhares de cavernas já terem sido estudadas no Quadrilátero Ferrífero, nenhuma outra colônia desta proporção é conhecida para a região.

O comportamento de segregação sexual é comum entre os vertebrados e diversos fatores podem levar as espécies a apresentarem este comportamento (Main & Cobientz, 1996, Ruckstuhl, 2007). Uma hipótese para explicar a segregação em *A. geoffroyi*, com base em estudo realizado por Saldaña-Vázquez *et al.* (2020), é que as fêmeas grávidas busquem abrigos mais quentes e que apresentem condições microclimáticas mais adequadas de temperatura para um melhor desenvolvimento pré-natal de suas proles. Os autores desse estudo (Saldaña-Vázquez *et al.*, 2020) observaram que, em seis populações de *A. geoffroyi* avaliadas em florestas temperadas do México, a sazonalidade afeta a proporção sexual e a fenologia da espécie, sendo que os abrigos ocupados predominantemente por fêmeas apresentavam uma temperatura superior em até 8°C, durante os meses mais quentes e úmidos em relação a outras colônias.

Estimativa populacional e variação anual

O presente estudo é um dos primeiros a utilizar a metodologia de marcação captura e recaptura para realizar estimativa populacional de morcegos em cavernas no Brasil e o primeiro de Minas Gerais. Até o momento, nenhum estudo específico havia sido realizado com *A. geoffroyi*. Deste modo, as populações monitoradas durante este estudo são as mais numerosas de *A. geoffroyi* que se têm registro no país até o momento.

As maiores estimativas aqui encontradas ocorreram após o registro das menores taxas de recaptura, em ambas as colônias e coincidiram

January and April. Afterwards, males apparently also leave the shelter, resulting in a very different pattern than the ones described so far. In the studied colonies the shelters to which the females go are unknown so far, but they may occupy other shelters forming large maternity colonies or dividing into small groups. Although thousands of caves have already been studied in the Iron Quadrangle, no other colony of this proportion is known for the region which leads to believe that perhaps the second hypothesis is the most probable.

*Sex segregation behavior is common among vertebrates and several factors can lead species to exhibit this behavior (Main & Cobientz, 1996, Ruckstuhl, 2007). Saldaña-Vázquez et al. (2020) hypothesis to explain segregation in *A. geoffroyi*, is that pregnant females seek warmer shelters that have more suitable microclimatic temperature conditions for better prenatal development of their offspring. The authors of this study (Saldaña-Vázquez et al., 2020) observed that in six populations of *A. geoffroyi* evaluated in temperate forests of Mexico, seasonality affects sex ratio and phenology of the species. Shelters occupied predominantly by females had a temperature that was up to 8°C higher than the other colonies during the warmer and more humid months.*

Population estimate and annual change

*This study is one of the first to use the capture and recapture tagging methodology to estimate bat populations in caves in Brazil and the first in Minas Gerais. No specific studies have been conducted with *A. geoffroyi* so far. Therefore, the populations monitored during this study are *A. geoffroyi* most numerous populations recorded in the country until now.*

The highest estimates found here occurred after the lowest recapture rates were recorded and coincided with the period of predominance of females in both colonies. This period corresponds to the beginning of the mating season, with subsequent recording of pregnant females in the following months. On the other hand, the highest recapture rates occurred, as expected, from January to April, when popula-

com o período de predominância das fêmeas em ambas as colônias. Esse período corresponde ao início do período de acasalamentos, com posterior registro de fêmeas grávidas nos meses seguintes. Por outro lado, as maiores taxas de recaptura ocorreram, como esperado, no período de janeiro a abril, momento em que as estimativas populacionais foram menores uma vez que as fêmeas já haviam abandonado os abrigos e as colônias eram compostas majoritariamente pelos machos (Jolly, 1965; Seber, 1965; 1982). Considerando que as estimativas tiveram como base amostras homogêneas para ambas as cavernas e na mesma escala de tempo, as estimativas obtidas representam uma aproximação de valores reais e que refletem a dinâmica das populações, as quais, apesar de pequenas variações, mostraram um padrão muito semelhante em ambas as cavernas. Se considerarmos a média de todos os valores mensais obtidos, principalmente na MJ-05, esse valor é muito próximo à estimativa obtida para o mês de julho, quando havia uma maior equitabilidade entre machos e fêmeas nos abrigos.

De acordo com as estimativas populacionais, as cavernas utilizadas como abrigos por essas colônias podem ser consideradas como de extrema importância para a conservação local da espécie, uma vez que representam as maiores populações conhecidas até o momento no país. Além disso, sua presença altera significativamente a dinâmica trófica e ambiental destes ambientes, por meio do depósito contínuo de matéria orgânica (fezes e restos alimentares) em seu interior, sendo, portanto, passíveis de serem classificadas como "bat caves". Ferreira (2019) definiu estas cavernas como "aquelas que abrigam colônias de morcegos que modificam, devido à sua presença, todo o ambiente trófico e climático da caverna, independentemente do número absoluto de morcegos". Na caverna MJ-05, por exemplo, fezes e restos alimentares foram observados frequentemente sendo consumidos por invertebrados, em especial por uma espécie de *Amphipoda* do gênero *Hyaella* S. I. Smith, 1874 que vive associada à drenagem subterrânea em seu interior (Figura 7). Nestas cavernas, as fezes são o principal recurso trófico existente e certamente determinam toda a estrutura e composição das comunidades de invertebrados a elas associadas.

tion estimates were lower because females had already left the shelters and the colonies were mainly composed of males (Jolly, 1965; Seber, 1965; 1982). Considering that the estimates were based on homogeneous samples for both caves and on the same time scale, the estimates obtained represent an approximation of real values and reflect the dynamics of the populations. Despite small variations they showed a very similar pattern in both caves. If we consider the obtained monthly values average, especially in MJ-05, this value is very close to the estimate obtained for the month of July, when there was a greater equitability between males and females in the shelters.

According to population estimates, the caves used as shelters by these colonies can be considered as extremely important for the local conservation of the species, since they represent the largest known populations in the country. In addition, their presence significantly alters the trophic and environmental dynamics of these environments, through the continuous deposit of organic matter (feces and food remains) inside them, being likely classified as "bat caves". Ferreira (2019) defined these caves as "those that harbor colonies of bats that modify, due to their presence, the entire trophic and climatic environment of the cave, regardless of the absolute number of bats". In cave MJ-05 for example, feces and food remains were frequently observed being consumed by invertebrates, in particular by a species of Amphipoda of the genus Hyaella S. I. Smith, 1874 that lives associated with underground drainage inside (Figure 7). In these caves, feces are the main trophic resource and certainly determine the entire structure and composition of the invertebrate communities associated with them.



Figura 7 – Amphipoda do gênero *Hyalella* e planárias (*Dugesidae*) (A), isópodos *Trichorhina* (B) e ácaros (C) associados a fezes e restos alimentares dos morcegos; D) Guano de *Anoura geoffroyi* depositado no piso da Loca dos Morcegos.

Figure 7 – Amphipoda of the genus *Hyalella* and planaria (*Dugesidae*) (A), *Trichorhina* isopods (B) and mites (C) associated with feces and food remains of the bats; D) Guano of *Anoura geoffroyi* deposited on the floor of Loca dos Morcegos cave.

Além disso, diversos autores consideram *A. geoffroyi* como uma espécie essencial aos ecossistemas epigeos por contribuir de forma significativa para a polinização de diferentes espécies vegetais (Caballero-martinez & Manzano, 2009; Gribel & Hay, 1993; Muchhala & Jarrín, 2002; Tschapka & Dressler, 2002; Whittaker & Jones, 1994). Os serviços ecossistêmicos realizados por grandes populações de morcego geram milhões de dólares anualmente. Em populações de insetívoros, estima-se que o consumo de pragas realizadas pelos morcegos, residentes em cavernas ou não, podem chegar a milhões por ano (Medellin et al., 2017, Aguiar et al. 2021). Além disto, milhões de dólares ainda são gerados anualmente com a realização do turismo em “bat caves”, tanto no México quanto nos EUA (Medellin et al., 2017); Assim como o observado nestes estudos, populações nume-

*In addition, several authors consider *A. geoffroyi* as an essential species to epigeal ecosystems due to their significant contribution to the pollination of different plant species (Caballero-martinez & Manzano, 2009; Gribel & Hay, 1993; Muchhala & Jarrín, 2002; Tschapka & Dressler, 2002; Whittaker & Jones, 1994). The ecosystem services performed by large bat populations generate millions of dollars annually. In insectivore populations, it is estimated that pest consumption performed by cave-dwelling and non-cave-dwelling bats can reach millions per year (Medellin et al., 2017, Aguiar et al. 2021). Furthermore, millions of dollars are still generated annually from “bat caves” tourism in both Mexico and the USA (Medellin et al., 2017). As observed in these studies, large populations of *A. geoffroyi* as well as other necta-*

rosas de *A. geoffroyi* bem como de outros nectarívoros, certamente desenvolvem importante papel ecológico nas áreas em que ocorrem, sendo necessária a realização de estudos que quantifiquem os serviços ecossistêmicos destas populações para as áreas de ocorrência.

Vale destacar, ainda, que as taxas de recapturas observadas no presente estudo podem ser consideradas elevadas quando comparadas com outros estudos realizados com morcegos no Brasil (Pedro & Taddei, 1997; Arnone, 2008; Lourenço, 2011). De modo geral, as taxas de recapturas elevadas indicam áreas de forrageamento limitadas, elevada disponibilidade local de recursos e alta fidelidade ao abrigo (Fleming *et al.*, 1972), o que denota maior importância a estes abrigos.

Implicações para a conservação

O presente estudo corrobora com inferências anteriores sobre o comportamento cavernícola de *A. geoffroyi*, conforme proposto por Guimarães & Ferreira (2014). No entanto, demonstra também a complexidade da dinâmica populacional da espécie, com variações populacionais significativas ao longo do ano, segregação sexual bem definida e o uso de diferentes abrigos (cavernas ou não) para completar seu ciclo reprodutivo.

Dessa forma, a necessidade da existência de abrigos para o acasalamento, gestação e posterior maternidade, além de variações populacionais expressivas ao longo do ano, podem colocar em risco a preservação de grandes populações em decorrência da possibilidade legal de supressão de cavernas, conforme previsto pelo Decreto Federal 6.640/2008. De forma geral, consideramos que a legislação atual negligencia a importância dos morcegos em suas métricas de análise de relevância para cavidades naturais subterrâneas, desconsiderando a importância destas populações no aporte energético e, principalmente, nos serviços ecossistêmicos prestados por estas populações nos ambientes epígeos. Além disso, tendo em vista esta relação peculiar de *A. geoffroyi* com cavernas, o método de amostragem usual (duas coletas ao longo do ano) pode não ser suficiente para a identifi-

rivores certainly play an important ecological role in the areas where they occur, and studies are needed to quantify the ecosystem services of these populations to those areas.

*It is also worth noting that the recapture rates observed in this study can be considered high when compared to other studies conducted with bats in Brazil (Pedro & Taddei, 1997; Arnone, 2008; Lourenço, 2011). In general, high recapture rates indicate limited foraging areas, high local resource availability, and high shelter fidelity (Fleming *et al.*, 1972), which denotes greater importance to these shelters.*

Implications for conservation

*This study corroborates previous inferences about *A. geoffroyi* cave behavior, as proposed by Guimarães & Ferreira (2014). However, it also demonstrates the complexity of the species population dynamics, with significant population variations throughout the year, well-defined sexual segregation and the use of different shelters (caves or not) to complete its reproductive cycle.*

*The need for the existence of shelters for mating, gestation and subsequent maternity, in addition to significant population variations throughout the year, may put at risk the preservation of large populations due to the legal possibility of suppression of caves as provided by the Federal Decree 6.640/2008. In general, we consider that the current legislation neglects the importance of bats in its relevance analysis metrics for underground natural caves. It disregards the importance of these populations in the organic matter contribution and, especially, in the ecosystem services provided by these populations in the epigeal environments. Furthermore, in view of this peculiar relationship between *A. geoffroyi* and caves, the usual sampling method (two collections throughout the year) may not be sufficient for the identification of these breeding sites. As demonstrated in this study, depending on the sampling period, caves that house hundreds of bats throughout the year may have only a few individuals during a few days, resulting in erroneous inferences about the importance*

cação destes sítios de reprodução da espécie, uma vez que, conforme demonstrado neste estudo, a depender do período da amostragem, cavernas que abrigam centenas de morcegos durante todo o ano, podem apresentar apenas poucos indivíduos, durante alguns poucos dias resultando, portanto, em inferências equivocadas sobre a importância deste ambiente. A supressão de cavernas pouco expressivas em tamanho como as avaliadas no presente estudo, poderia provocar um significativo impacto sobre a espécie localmente, alterando toda a dinâmica ambiental com a qual a mesma está relacionada.

Atualmente, os únicos atributos da legislação que permitem indiretamente proteger a quiroptero-fauna correspondem a "Interações ecológicas únicas e abrigo essencial para preservação de populações geneticamente viáveis de espécies animais em risco de extinção, constantes de listas oficiais" e nenhum contempla a quiroptero-fauna de forma direta, mesmo que esta apresente grandes populações, capazes de alterar completamente a dinâmica ambiental de cavernas e do ambiente epígeo. Além disso, outros atributos como riqueza de espécies de morcegos, diversidade de guildas tróficas, assim como as relações ecológicas específicas de algumas espécies, também deveriam ser consideradas neste instrumento legal (Barros *et al.*, 2020).

De acordo com as listas oficiais, poucas espécies de morcegos se enquadrariam neste atributo. O livro vermelho de fauna ameaçada de extinção (2016) cita apenas sete espécies, sendo estas; *Furipterus horrens* (F. Cuvier, 1828), *Natalus macrourus* (Gervais, 1856), *Glyphonycteris behnii* (Peters, 1865), *Lonchorhina aurita* Tomes, 1863, *Xeronycteris vieirai*, Gregorin & Ditchfield 2005, *Eptesicus taddeii* Miranda, Bernardo & Passos 2006, ambas enquadradas na categoria de vulnerável (VU) e *Lonchophylla dekeyseri* Taddei, Vizotto & Sazima 1983, na categoria Em perigo (EN).

Infelizmente, este atributo ajuda a proteger apenas uma pequena parcela das mais de 81 espécies de morcegos que sabidamente utilizam cavernas no Brasil e que não necessariamente representam um papel ecológico tão importante para ecossistemas epígeos e subterrâneos quando comparado com espécies de

of this environment. The suppression of small sized caves, such as those evaluated in this study, could have a significant impact on the species locally, changing the entire environmental dynamic to which it is related.

*Currently, the only legislation attributes that allow indirect protection of chiroptero-fauna correspond to: "Unique ecological interactions and Shelter essential for the preservation of genetically viable populations of endangered animal species, included in official lists". None contemplates chiroptero-fauna directly, even if it presents large populations, capable of completely changing the environmental dynamics of caves and the epigeal environment. In addition, other attributes such as bats species richness, diversity of trophic guilds, as well as the specific ecological relationships of some species, should also be considered in this legal instrument (Barros *et al.*, 2020).*

*According to official lists, few bat species would fit this attribute. The red book of endangered fauna (2016) cites only seven species, these being; *Furipterus horrens* (F. Cuvier, 1828), *Natalus macrourus* (Gervais, 1856), *Glyphonycteris behnii* (Peters, 1865), *Lonchorhina aurita* Tomes, 1863, *Xeronycteris vieirai* Gregorin & Ditchfield 2005, *Eptesicus taddeii* Miranda, Bernardo & Passos, 2006 both in the vulnerable category (VU) and *Lonchophylla dekeyseri* Taddei, Vizotto & Sazima, 1983 in the endangered category (EN).*

*Unfortunately, this feature helps protect only a small portion of the more than 81 species of bats known to use caves in Brazil. These portion do not necessarily play such an important ecological role for epigeal and subterranean ecosystems when compared to relatively common bat species such as *Anoura geoffroyi*. Moreover, the attribute does not include the 13 bats species considered essentially cave-dwelling (Guimaraes & Ferreira, 2014). Therefore, due to the weaknesses found in the current Brazilian environmental legislation and the lack of knowledge about the natural history of most species, essentially cave-dwelling bats may be seriously threatened by landscape changes and misuse of natural resources. They may suffer*

morcegos relativamente comuns como *Anoura geoffroyi*. Além disto, o atributo não contempla as 13 espécies de morcegos consideradas essencialmente cavernícolas (Guimaraes & Ferreira, 2014). Sendo assim, consideramos que devido às fragilidades encontradas na atual legislação ambiental brasileira e a falta de conhecimento sobre história natural da maioria das espécies, morcegos essencialmente cavernícolas podem estar seriamente ameaçados por alterações na paisagem e utilização equivocada dos recursos naturais, podendo sofrer declínios populacionais significativos em algumas regiões pressionadas pela supressão de cavernas, em decorrência do desenvolvimento econômico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Santuário Nossa Senhora da Piedade e a Vale S.A., representada pela Gerência de Espeleologia (DIFP), por permitirem acesso às áreas de estudo e por fornecerem apoio logístico para realização do trabalho. Agradecemos ao Comitê de Ética da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - (CEUA-PUC) e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelas autorizações de pesquisa concedidas. À PUC-Minas pela bolsa de estudos concedida.

significant population declines in some regions pressured by the suppression of caves due to economic development.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Santuário Nossa Senhora da Piedade and Vale S.A. represented by the Speleology Management (DIFP) for allowing access to the study areas and for providing logistical support for the work. We thank the Ethics Committee of the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (CEUA-PUC) and the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (ICMBio) for the research authorizations granted. We thank PUC-Minas for the scholarship granted.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- AGUIAR, L. M. S.; Rocha, I. D. B.; Oliveira, G.; FRIZZAS, M. R.; Togni, P. H. B. Going out for dinner - The consumption of agriculture pests by bats in urban areas. *PLoS One*, v. 16, p. e0258066, 2021.
- ALMEIDA, E. O.; MOREIRA, E. C.; NAVEDA, L. A. B.; HERRMANN, G. P. Combate ao *Desmodus rotundus rotundus* (E. Geoffroy, 1810) na região cárstica de Cordisburgo e Curvelo, Minas Gerais. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v.54, n. 2, p. 1-9, 2002.
- ALVAREZ, T.; RAMIREZ-PULIDO, J. Notas acerca de murciélagos mexicanos. *Anales de La Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*. México, v.19, p.167-178, 1972.
- ANTHONY, E. L. P. Age determination in bats. In: *Ecological and Behavioral Methods for the Study of Bats*. (T. H. Kunz, ed.). Washington, DC: *Smithsonian Institution Press*, p. 47-57, 1988.
- ARNOME, I. S. Estudo da comunidade de morcegos na área cárstica do Alto Ribeira – SP. Uma comparação com 1980. 2008. 121f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- BARROS, R. S. M.; BISAGGIO, E. L.; BORGES, R. C. Morcegos (Mammalia, Chiroptera) em fragmentos florestais urbanos no município de Juiz de Fora, Minas Gerais, Sudeste do Brasil. *Biota Neotropica*, v.6, n.1, p.1-6, 2006.
- BARROS, J. S.; GOMES, A. M.; GUIMARAES, M. M.; DIAS-SILVA, L.; ROCHA, P. A.; TAVARES, V. C.; BERNARD, E. Análise de relevância de cavernas: uma revisão da IN 02/2017 sob a perspectiva dos morcegos. *Boletim da Sociedade Brasileira de Mastozoologia*, v. III, p. 1-9, 2020.
- BAUMGARTEN, J. E.; VIEIRA, E. M. Reproductive seasonality and development of *Anoura geoffroyi* (Chiroptera: Phyllostomidae) in central Brazil. *Mammalia*, v. 58, n. 3, p.415-422, 1994.
- BERNARD, E.; FENTON, M. B. Bat mobility and roosts in a fragmented landscape in central Amazonia, Brazil. *Biotropica*, v. 35, n.2, p.262-277, 2003.
- BIANCONI, G. V.; MIKICH, S. B.; PEDRO, W. A. Movements of bats (Mammalia, Chiroptera) in Atlantic Forest remnants in southern Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v.23, n.4, p.1199-1206, 2006.
- BREDT, A.; UIEDA, W.; MAGALHAES, E. D. Morcegos cavernícolas da região do Distrito Federal, centro-oeste do Brasil (Mammalia, Chiroptera). *Revista Brasileira de Zoologia*, v.16, n.3, p.731-770, 1999.
- BUENO, M. E. T. Geografia da Serra da Piedade. In: *Serra da Piedade* (DUARTE, R.H., org.). Belo Horizonte: CEMIG, p.136, 1992.
- CABALLERO-MARTÍNEZ, L. A.; MANZANO, I. V. R. Hábitos alimentarios de *Anoura geoffroyi* (Chiroptera: Phyllostomidae) em Ixtapan Del Oro, Estado do México. *Acta Zoologica Mexicana*, v. 25, n.1, p.161-175, 2009.
- CAMPANHÃ, R.A.C.; FOWLER, H.G. Movements patterns and roosts of the vampire bat *Desmodus rotundus* in the interior of São Paulo State. *Naturalia*, São Paulo, v.20, p.191-194, 1995.
- COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa nº147, de 30 de abril de 2010. Lista de Espécies Ameaçadas de Extinção da
- EISENBERG, J. F.; REDFORD, K. H. The contemporary mammalian fauna. In: *Mammals of the Neotropics – The Central Neotropics*, v.3, The University of Chicago Press, Chicago. 1999.

ESBÉRARD, C. E. L.; MOTTA, J. A.; PERIGO, C. Morcegos cavernícolas da área de proteção ambiental (APA) Nascentes do Rio Vermelho, Goiás. *Revista brasileira de Zoociências*, v.7, n. 2, p.311-325, 2005.

FARIAS, T. O.; TALAMONI, S. A.; GODINHO, H. P. Reproductive dynamics of the nectarivorous Geoffroy's tailed bat *Anoura geoffroyi* (Glossophaginae) in a highland Neotropical area of Brazil, with evidence of a mating period. *Acta Chiropterologica*, v.20, n.1, p. 251-261, 2018.

FERREIRA, R. L. Guano communities. In *Encyclopedia of Caves* (pp. 474-484). Academic Press. p. 474-484, 2019.

FLEMING, T. H.; HOOPER, E. T.; WILSON, D. E. Three Central American Bats Communities: structure, reproductive cycles, and movement patterns. *Ecology*, v.53, n.4, p.556-569, 1972.

GALINDO-GALINDO, C.; CASTRO-CAMPILLO, A.; SALAME-MÉNDEZ, A., RAMÍREZ-PULIDO, J. Reproductive events and social organization in a colony of *Anoura geoffroyi* (Chiroptera: Phyllostomidae) from a temperate Mexican cave. *Acta Zoológica Mexicana*, n.80, p.51-68, 2000.

GOODWIN, G. G.; GREENHALL, A. M. A review of the bats of Trinidad and Tobago. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, v.122, p.191-301, 1961.

GRIBEL, R.; HAY, J.D. Pollination ecology of *Caryocar brasilienses* (Caryocaraceae) in GRIBEL, R.; HAY, J. D. Pollination ecology of *Caryocar brasilienses* (Caryocaraceae) in central Brazil cerrado vegetation. *Journal of Tropical Ecology*, p.199-211, 1993.

GUIMARÃES, M. M.; FERREIRA, R. L. Morcegos cavernícolas do Brasil: Novos registros e desafios para conservação. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v.2, n.4, p.1-33, 2014.

HEIDEMAN, P. D.; DEORAJ, P.; BRONSON, F. H. Seasonal reproduction of a tropical bat, *Anoura geoffroyi*, in relation to photoperiod. *Journal of reproduction and fertility*, v.96, n.2, p.765-773, 1992.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente. Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção. p.1-76, 2016

Instrução Normativa N°- 2, de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Diário Oficial da União, Brasília.

IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. Versão 2016.3. Disponível em: <www.iucnredlist.org>. Acesso em: 07 dez. 2021.

JOLLY, G. M. Explicit estimates from capture-recapture data with both death and immigration—stochastic model. *Biometrika*, p.225–247. 1965.

KREBS, C. J. *Ecological Methodology*. 2nd ed. Benjamin Cummings, Menlo Park, California. p.620, 1999.

LEITE, A.P. Uso do espaço por *Artibeus lituratus* e *Sturnira lilium* (Chiroptera: Phyllostomidae) em fragmentos florestais urbanos de Curitiba, Paraná. 2008. 113f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Ciências Biológicas, Zoologia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LOURENÇO, E. C. *Marcação- recaptura de morcegos: relevância e exemplos de estudos ecológicos*. 2011. 96f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal. Rio de Janeiro. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

- MAIN, M. B.; COBLENTZ, B.E. Sexual segregation in rocky mountain mule deer. *Journal of Wildlife Manage*, v.60, p.497-507, 1996.
- MANTILLA-MELUK, H.; BAKER, R.J. New species of *Anoura* (Chiroptera: Phyllostomidae) from Colombia, with systematic remarks and notes on the distribution of the *A. geoffroyi* complex. *Occasional Papers of the Museum of Texas Tech University*. Lubbock, v.292, p.1-19, 2010.
- MARKUS, M. *Avaliação das áreas de preservação permanente na microbacia do Ribeirão da Casa Branca – Brumadinho*. MG. Monografia (Especialização). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geo Ciências, Especialização em Geoprocessamento, Belo Horizonte. 2003.
- MARTINS, M. A. *Morcegos cavernícolas em uma área de cerrado no sudeste do Brasil: composição de espécies e uso de abrigo*. 2015. 94f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2015.
- MEDELLIN, R. A.; WIEDERHOLT, R; HOFFMAN, L. L. Conservation relevance of bat caves for biodiversity and ecosystem services. *Biological Conservation*, v. 211, p.45-50, 2017.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Portaria N° 444, de 17 de dezembro de 2014.
- MORATELLI, R. M.; PERACCHI, A. L. Morcegos (Mammalia, Chiroptera) do Parque nacional da Serra dos Órgãos. p.194 - 209, 2007. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/parnaserrado-sorgaos/images/stories/Moratelli_Peracchi_2007.pdf>. Acesso: out. 2017.
- MUCHHALA, N.; JARRÍN-V, P. Flower Visitation by Bats in Cloud Forests of Western Ecuador. *Biotropica*, v.34, n.3, p.387-395, 2002.
- OLIVEIRA, N. Y. K. *Estrutura de comunidade, reprodução e dinâmica populacional de morcegos (Mammalia, Chiroptera) na Reserva Natural do Salto Morato, Guaraqueçaba, Paraná*. 2010. 109f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.
- PACHECO, V.; SÁNCHEZ-VENDIZÚ, P.; SOLARI, S. A new species of *Anoura* Gray, 1838 (Chiroptera: Phyllostomidae) from Peru, with taxonomic and biogeographic comments on species of the *Anoura* caudifer complex. *Acta Chiropterologica*, v.20, p. 31-50, 2018.
- PEDRO, W. A.; TADDEI, V.A. Taxonomic assemblage of bats from Panga Reserve, southeastern Brazil: abundance patterns and trophic relations in the Phyllostomidae (Chiroptera). *Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão*, v.6, p.3-21, 1997.
- PORTELLA, A. S. *Morcegos cavernícolas e relações parasita-hospedeiro com moscas estreblídeas em cinco cavernas do distrito federal*. 2010. 69f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia. Brasília. 2010.
- STATSOFT, INC. (2004) STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com
- REIS, A.S.; ZAMPAULO, R.A.; DORNELLES, G.D.P. ; GRACIOLLI, G.; TALAMONI, S.A. Variation of dipteran ectoparasites (Streblidae) on *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 (Phyllostomidae) in two caves in southeastern Brazil. *Parasitology Research*. 2021.
- REIS, A.S.; ZAMPAULO, R.A.; BERNARDI, L. F.O.; TALAMONI, S.A. Monunguis streblida (Neothrombidiidae) in Brazil and its parasitic relationships with dipteran ectoparasites (*Anastrebla* and *Trichobius*) of bats. *Parasitology Research*. v.118, p. 2467-2473, 2019.
- REIS, N. R. J.; PERACCHI, A. L.; BATISTA, C. B.; LIMA, I. P.; PEREIRA, A. D. *História natural dos morcegos brasileiros; chave de identificação de espécies*. Rio de Janeiro. Technical Books, 2017. 416p.

- REIS, N. R.; FREGONEZI, M. N.; PERACCHI, D. L.; SHIBATTA, O. A. *Morcegos do Brasil: guia de campo*. Rio de Janeiro. Technical Books, 2013. 252p.
- ROCHA, A. D. *Estudo da assembleia de quirópteros (Mammalia: Chiroptera) da Gruta do Riacho Subterrâneo – município de Itu, SP*. 2015. 74f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Ecologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de São Carlos. 2015.
- RUCKSTUHL, K. E. Sexual segregation in vertebrates: proximate and ultimate causes. *Oxford University Press, Canada*, v.47, n.2, p. 245-257, 2007.
- SALDAÑA-VÁZQUEZ, R. A.; ORTEGA, J.; GUERRERO, J. A.; AIZA-REYNOSO, M.; MACSWINEY, G. M. C.; AGUILAR-RODRÍGUEZ, P. A.; AYALA-BERDON, J.; ZAMORA-GUTIERREZ, V. Ambient temperature drives sex ratio and presence of pregnant females of *Anoura geoffroyi* (Phyllostomidae) bats living in temperate forests. *Journal of Mammalogy*, v.101, n.1, p. 234-240, 2020.
- SEBER, G. A. F. A note on the multiple-recapture census. *Biometrika* 52, p.249–259. 1965.
- SEBER, G. A. F. The estimation of animal abundance and related parameters. Edward Arnold, Londres, p.654, 1982.
- SOUZA, F.C.R.; CARMO FF (2015) Geossistemas ferruginosos no Brasil. p. 47- 76. IN: Carmo FF, Kamino LHY (Org.) Geossistemas Ferruginosos do Brasil: Áreas prioritárias para a conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. v.1, p.551. 2015.
- TORQUETTI, C. G.; SILVA, M. X.; TALAMONI, S. A. Differences between caves with and without bats in a Brazilian Karst habitat. *Zoologia, An international Journal for Zoology*, v.34, p.1-7, 2017.
- TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 2, n. 5, p.255-320, 1985.
- TRAJANO, E. Movements of cave bats in South eastern Brazil, with emphasis on the population ecology of the common vampire bat, *Desmodus rotundus* (Chiroptera). *Biotropica*, v.28, n.1, p.121-129, 1996.
- TSCHAPKA, M.; DRESSLER, S. Chiropterophily: On bat-flowers and flower-bats. *Curtis's Botanical Magazine*, v.19, n.2, p.114–125, 2002.
- WHITTAKER, R. J.; JONES, S. H. The Role of Frugivorous Bats and Birds in the Rebuilding of a Tropical Forest Ecosystem, Krakatau, Indonesia. *Journal of Biogeography*, v.21, n.3, p.245-258, 1994.
- ZORTÉA, M. Reproductive patterns and feeding habits of tree nectarivorous bats (Phyllostomidae: Glossophaginae) from the Brazilian Cerrado. *Jornal da Biologia do Brasil*, v. 63, n. 1, p.159-168, 2003.

POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE BACTÉRIAS CULTIVÁVEIS OBTIDAS A PARTIR DA GRUTA MARTIMIANO II, PARQUE ESTADUAL DO IBITIPOCA – MG

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF CULTURABLE BACTERIA OBTAINED FROM MARTIMIANO II CAVE, IBITIPOCA STATE PARK - MG

Autora

Lara Chaves Carvalho Guerra

Universidade de São Paulo
e-mail: laraguerra@usp.br

Coautores

Camila Gracyelle de Carvalho Lemes; Lendro Marcio Moreira

RESUMO

A Gruta Martimiano II é a maior caverna quartzítica do Brasil e está localizada no Parque Estadual do Ibitipoca – Minas Gerais. As condições ambientais únicas e o baixo aporte energético das cavidades atuam como pressões seletivas nos organismos que as habitam. A microbiota tem grande importância ecológica e biotecnológica, uma vez que microrganismos cultiváveis são amplamente utilizados como recursos na agricultura, indústria farmacêutica e em bioprocessos. Entretanto, são poucos os estudos sobre a microbiota cavernícola e seu potencial biotecnológico. Os objetivos deste trabalho foram bioprospectar e analisar o potencial biotecnológico de bactérias associadas ao piso, teto e parede da Gruta Martimiano II. Um total de 12 amostras oriundas de quatro áreas da caverna foram obtidas. A caracterização das fases minerais foi feita por difração de raios X. As amostras foram então lavadas e diluídas em série com água de torneira autoclavada. O lavado foi plaqueado em meio de cultura rico e após 3 dias as colônias bacterianas foram isoladas, preser-

ABSTRACT

The Martimiano II Cave is the largest quartzite cave in Brazil and is located in the Ibitipoca State Park - Minas Gerais. The unique environmental conditions and the low energy input of the cavities act as selective pressures on the organisms inhabiting them. The microbiota has great ecological and biotechnological importance, since cultivable microorganisms are widely used as resources in agriculture, pharmaceutical industry and in bioprocesses. However, there are few studies on cave microbiota and their biotechnological potential. The objectives of this work were to bioprospect and analyze the biotechnological potential of bacteria associated with the floor, ceiling and wall of the Martimiano II Cave. A total of 12 samples from four areas of the cave were obtained. Characterization of the mineral phases was done by X-ray diffraction. The samples were then washed and serially diluted with autoclaved tap water. The wash was plated on rich culture medium and after 3 days the bacterial colonies were isolated,

vadas, os testes bioquímicos foram realizados e o isolado de maior potencial foi identificado. As fases minerais caracterizadas foram as mesmas entre as amostras, compostas por quartzo, muscovita, caulinita e gibbsita. Foram obtidos 72 isolados bacterianos que constituem hoje o primeiro banco de isolados bacterianos desta caverna. Três isolados tiveram a capacidade em fixar nitrogênio e um em solubilizar fosfato, componentes fundamentais ao desenvolvimento de plantas. Cinco isolados apresentaram possível antagonismo a *Klebsiella pneumoniae* e o isolado 14 foi capaz de inibir o crescimento de *K. pneumoniae* e *Staphylococcus aureus*. Em ensaio de inibição indireta o isolado 14 impediu o crescimento dos patógenos, foi caracterizado como móvel, Gram-negativo e identificado como *Peribacillus*. O ineditismo desta pesquisa corrobora o potencial de geração de novos conhecimentos acompanhado do desenvolvimento de novos produtos, agregando valor a serviços ecossistêmicos oriundos de um patrimônio genético desconhecido.

Palavras-chave: bioprospecção, caverna em quartzito, Gruta Martimiano II, microbiota, Parque Estadual do Ibitipoca, potencial biotecnológico.

INTRODUÇÃO

Caracterização da Área de Estudo

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIB) foi criado em 1973, por meio da Lei nº 6.126 do Governo de Minas Gerais, abrange as cidades de Lima Duarte, Santa Rita de Ibitipoca e Bias Fortes (Figura 1), totalizando 1488 hectares de extensão (Instituto Estadual de Floresta, 2007). Segundo o Instituto Estadual de Florestas (2007), o PEIB se localiza ao sul de Minas Gerais, no domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, na região denominada Zona da Mata (Figura 1), conta com diversas atrações turísticas como mirantes, quedas d'água, riachos e cavernas. O relevo do PEIB constitui-se de baixadas e serras que sobressaem num contexto regional, com altitudes médias de 1500 m, conhecido como Serra do Ibitipoca (Correa-Neto & Filho, 1997).

*preserved, biochemical tests were performed and the isolate with the highest potential was identified. The mineral phases characterized were the same among the samples, consisting of quartz, muscovite, kaolinite and gibbsite. A total of 72 bacterial isolates were obtained that now constitute the first bank of bacterial isolates from this cave. Three isolates had the ability to fix nitrogen and one to solubilize phosphate, fundamental components for plant development. Five isolates showed possible antagonism to *Klebsiella pneumoniae* and isolate 14 was able to inhibit the growth of *K. pneumoniae* and *Staphylococcus aureus*. In indirect inhibition assay isolate 14 prevented the growth of the pathogens, was characterized as mobile, Gram-negative and identified as *Peribacillus*. The novelty of this research corroborates the potential of generating new knowledge accompanied by the development of new products, adding value to ecosystem services from an unknown genetic heritage.*

Keywords: *bioprospecting, quartzite cave, Martimiano II Cave, microbiota, Ibitipoca State Park, biotechnological potential.*

INTRODUCTION

Study Area Characterization

The Ibitipoca State Park (Parque Estadual do Ibitipoca - PEIB) was created in 1973, by law 6.126 of the Minas Gerais State Government. It covers the cities of Lima Duarte, Santa Rita de Ibitipoca and Bias Fortes (Figure 1), totaling 1488 hectares in extension (INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTA, 2007). According to the State Forestry Institute (Instituto Estadual de Floresta - IEF) (2007), the PEIB is located in southern Minas Gerais, in the phytogeographic domain of the Atlantic Forest, in the region called Zona da Mata (Figure 1), and has several tourist attractions such as viewpoints, waterfalls, streams and caves. The relief of the PEIB is composed of lowlands and hills that stand out in a regional context, with average altitudes of 1500 m, known as Serra do Ibitipoca (Correa-Neto & Filho, 1997).

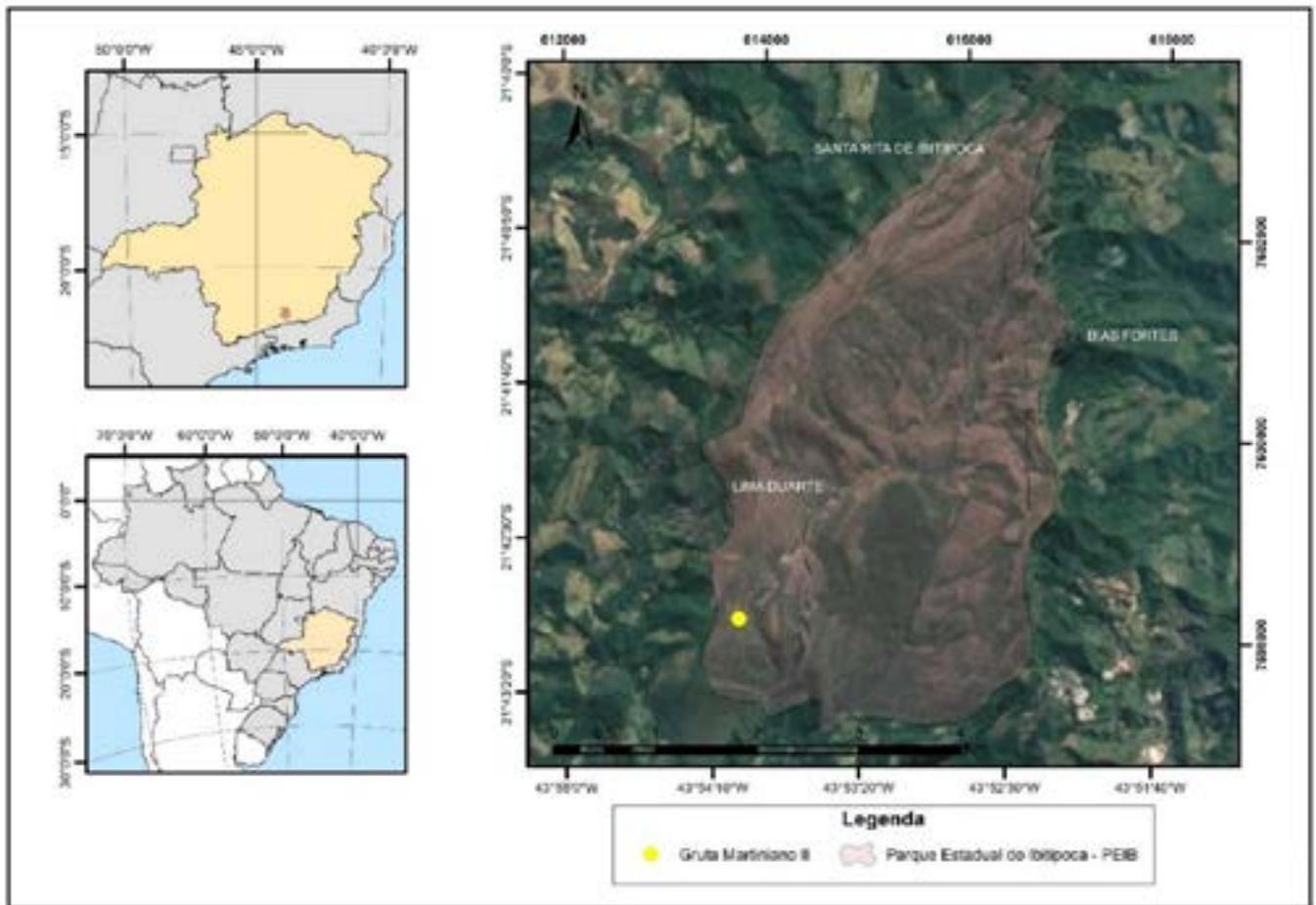


Figura 1 – Mapa de localização do Parque Estadual do Ibitipoca.

Figure 1 – Mapa de localização do Parque Estadual do Ibitipoca.

Segundo o Cadastro Nacional de Cavernas (CNC), administrado pela Sociedade Brasileira de Espeleologia, 40 cavernas são conhecidas no PEIB, por isso, é reconhecido por muitos autores como um importante distrito espeleológico mundial (Perez & Grossi, 1987; Nummer, 1991; Correa-Neto & Filho, 1997; Nummer, 2012; Bento, 2015). Tal importância se dá pela alta concentração de cavernas quartzíticas e suas dimensões notáveis, como a Gruta das Bromélias (2560 m de projeção horizontal) e a Gruta Martimiano II (4170 m de projeção horizontal).

A Gruta Martimiano II possui características únicas que a fazem notória no cenário nacional. Além do grande desenvolvimento, pouco comum para as rochas quartzíticas, possui morfologia com feições freáticas, com partes ativas e inativas (Lima *et al.*, 2017). Ela se desenvolve no contato entre três diferentes tipos de quartzitos, seus condutos e salões são

According to the National Cave Register (Cadastro Nacional de Cavernas - CNC), managed by the Brazilian Speleological Society (Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE), 40 caves are known in the PEIB. Therefore, it is recognized by many authors as an important speleological district worldwide (Perez & Grossi, 1987; Nummer, 1991; Correa-Neto & Filho, 1997; Nummer, 2012; Bento, 2015). Such importance is given by the high concentration of quartzite caves and their remarkable dimensions, such as the Bromélias Cave (2560 m horizontal projection) and the Martimiano II Cave (4170 m horizontal projection).

*The Martimiano II Cave has unique characteristics that make it nationally notorious. Besides the great development, unusual for quartzite rocks, it has morphology with phreatic features, with active and inactive parts (Lima *et al.*, 2017). It develops in the contact between three different types of quartzite, its conduits and halls are volumi-*

volumosos e os espeleotemas, de coloração avermelhada, chamam atenção por sua variedade e frequência (Figura 2) (Lima *et al.*, 2017). Nesse contexto, a Gruta Martimiano II, pode se apresentar como um importante reservatório de microbiota com função biológica específica

nous and the speleothems, of reddish color, draw attention for their variety and frequency (Figure 2) (Lima et al., 2017). In this context, the Martimiano II Cave, may present itself as an important reservoir of microbiota with specific biological function.

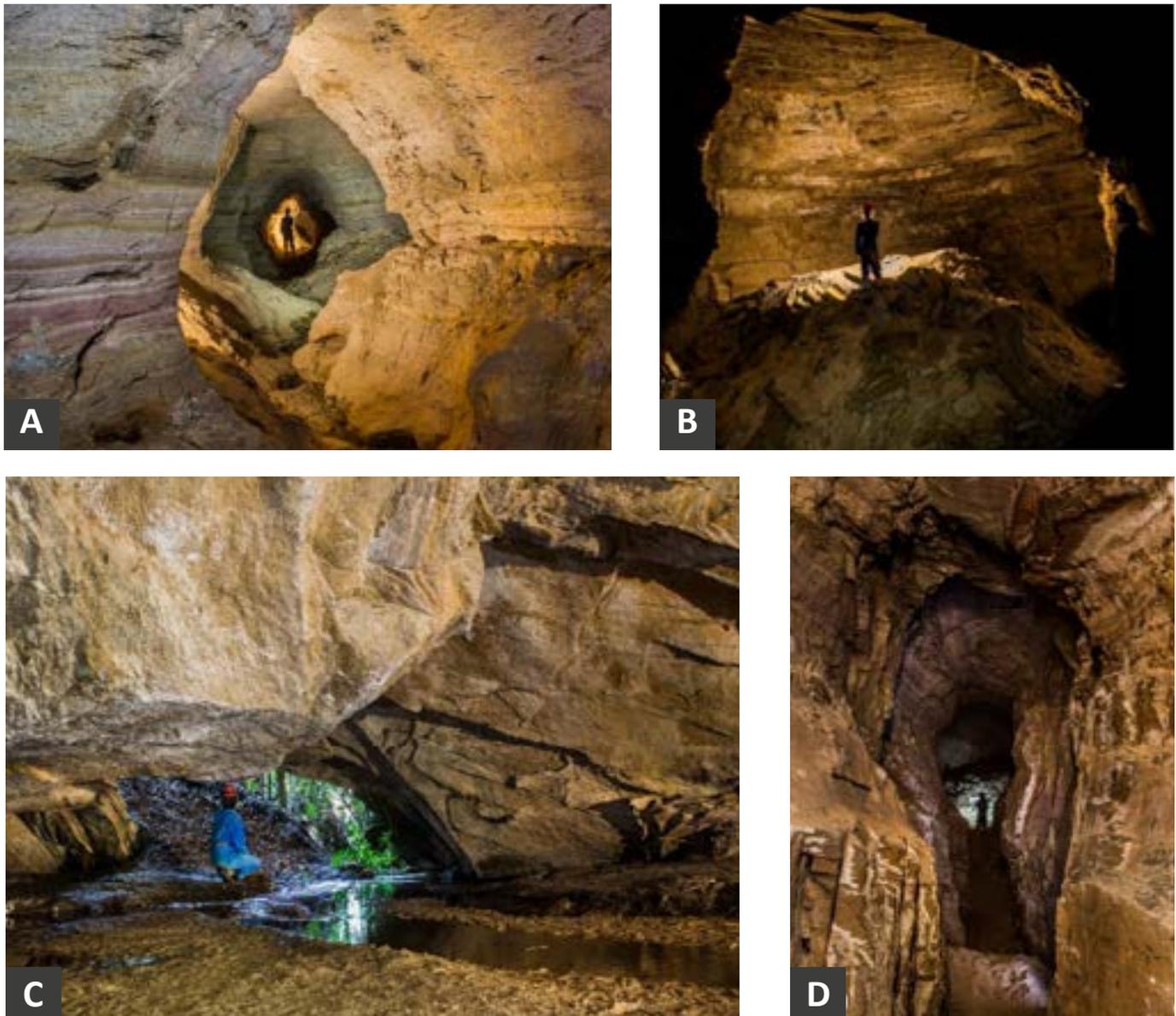


Figura 2 – Gruta Martimiano II. A) extenso conduto; B) salão da claraboia; C) segunda entrada; D) conduto da fechadura.

Figure 2 – Martimiano II Cave. A) extensive conduit; B) skylight hall; C) second entrance; D) keylock conduit.

Ambiente Cavernícola

Cada caverna é única em suas características biológicas, químicas e físicas (Ghosh *et al.*, 2017). Segundo Culver (1982), as cavernas são caracterizadas pela ausência de luz nas zonas mais profundas, escassez nutricional, taxas de

Cave Environment

Each cave is unique in its biological, chemical, and physical characteristics (GHOSH et al., 2017). According to Culver (1982), caves are characterized by the absence of light in the deeper zones, nutritional scarcity, humidity

umidade próximas a saturação e a temperatura do meio hipógeo se aproxima da média anual de temperatura do ambiente epígeo. Ressalta-se que os parâmetros ambientais são de grande relevância para o estudo da biologia subterrânea, por propiciarem as especializações a este ambiente (Culver, 1982; Trajano & Moreira, 1991; Ferreira & Pompeu, 1997; Gomes *et al.*, 2000).

A ocorrência de organismos fotossintetizantes é limitada às áreas com incidência luminosa e impossibilitada pela ausência de luz no interior das cavernas (Ferreira & Pompeu, 1997; Ferreira & Martins, 1999). Dessa forma, na maioria das cavernas, a entrada dos recursos alimentares é feita especialmente pela importação provocada por enxurradas, cursos d'água e águas de percolação (GILBERT *et al.*, 1994). Além disso, os animais presentes no ambiente cavernícola geram recursos alimentares para outros organismos (Ferreira, 2005) e os microrganismos presentes participam da produção primária e secundária de energia no ambiente hipógeo (Figura 5) (Ferreira *et al.*, 2004).

As cavernas são pouco estudadas do ponto de vista microbiológico e as características deste ambiente propiciam um habitat microbiano único, com pressões evolutivas diferentes do ambiente epígeo (Barton *et al.*, 2007). Com isso, os organismos presentes são mais especializados ao baixo aporte energético das cavernas, o que aumenta o interesse na identificação de microrganismos e estudos de caracterização biotecnológica.

Importância da Microbiota em um Contexto Ecológico

Os microrganismos estão presentes em todos os ambientes e apresentam grande importância num contexto ecológico (Moreira & Siqueira, 2006). Devido à enorme diversidade metabólica, os microrganismos participam ativamente de todos os ciclos biogeoquímicos e desempenham a função de reciclar grande parte da matéria na biosfera (Gaylarde, 2005). Os fatores abióticos e bióticos do ambiente influenciam diretamente na comunidade

rates close to saturation, and by the temperature of the hypogeous environment that approaches the annual average temperature of the epigeous environment. It is worth noting that environmental parameters are of great relevance to the study of subterranean biology, as they provide the specifics of this environment (Culver, 1982; Trajano & Moreira, 1991; Ferreira & Pompeu, 1997; Gomes et al., 2000).

The occurrence of photosynthesizing organisms is limited to light incidence areas and is made impossible by the absence of light in the interior of the caves (Ferreira & Pompeu, 1997; Ferreira & Martins, 1999). Therefore, entrance of food resources in most caves is made especially by the input provoked by torrents, water courses and percolation waters (Gilbert et al, 1994). In addition, the animals present in the cave environment, generate food resources for other organisms (Ferreira, 2005) and the microorganisms present participate in the primary and secondary production of energy in the hypogeous environment (Figure 5) (Ferreira et al., 2004).

Caves are scarcely studied from the microbiological point of view. The characteristics of this environment provide a unique microbial habitat, with different evolutionary pressures from the epigeal environment (Barton et al., 2007). The organisms present are more specialized to the low energy input of caves, which increases the interest in the identification of microorganisms and biotechnological characterization studies.

Microbiota Importance in an Ecological Context

Microorganisms are present in all environments and have great importance in an ecological context (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). Due to the enormous metabolic diversity, microorganisms actively participate in all biogeochemical cycles and perform the function of recycling much of the matter in the biosphere (Gaylarde, 2005). The abiotic and biotic factors of the environment directly influence the microbial community (Gaylarde, 2005),

microbiana (Gaylarde, 2005), o que torna ainda mais importante o conhecimento das condições ambientais para um completo conhecimento sobre a composição microbiana e seu funcionamento metabólico em diferentes ambientes (Lemes, 2018; Lemes, 2021).

As cavernas são consideradas ambientes extremos, por propiciarem formas de vida especializadas (Candiroglu, 2017). Embora suas peculiaridades sejam chamariz para novos estudos biotecnológicos, são ambientes pouco estudados do ponto de vista microbiológico, especialmente no Brasil. O que coloca a proposta deste trabalho em evidência na busca de novos organismos e conhecimentos biológicos que possam ser utilizados na geração de produtos e serviços.

Apesar de sua vasta distribuição e importância na manutenção da biosfera, os microrganismos ainda são pouco conhecidos. No caso de bactérias e arqueas, é estimado que menos de 1% da diversidade seja conhecida (Canhos & Manfio, 2001), e menos de 10% dos microrganismos existentes no planeta foram caracterizados e descritos (Staley, 2001). Isso é justificado pelo fato de que apenas cerca de 1 a 3% dos microrganismos terem a capacidade de cultivo em condições laboratoriais (Streit & Schmitz, 2004). Apesar disso, os métodos dependentes de cultivo continuam sendo utilizados, por possibilitarem a realização de experimentos *in vitro* e *in vivo* com os isolados obtidos (Hill *et al.*, 2000).

Potencial Biotecnológico dos Microrganismos

Na biotecnologia, a diversidade e o potencial bioquímico dos microrganismos é essencial como fonte de vários produtos com aplicações em praticamente todos os setores industriais (Figura 6) (Demain & Adrio, 2008). Os produtos microbianos são usados, por exemplo, como antibióticos, agentes tumorais e imunossupressores em indústrias farmacêuticas, sendo que, as cavernas apresentam alto potencial para a descoberta de compostos bacterianos bioativos e produção de novas drogas (Ghosh *et al.*, 2017).

which makes it even more important to know the environmental conditions for a complete understanding of the microbial composition and its metabolic functioning in different environments (Lemes, 2018; Lemes, 2021).

Because they provide specialized life forms, caves are considered extreme environments (Candiroglu, 2017). Although their peculiarities are an attraction for new biotechnological studies, they are rarely studied from the microbiological point of view, especially in Brazil. This puts the proposal of this work in evidence in the search for new organisms and biological knowledge that can be used in the generation of products and services.

*Despite their vast distribution and importance in maintaining the biosphere, microorganisms are still poorly known. In the case of bacteria and archaea, it is estimated that less than 1% of the diversity is known (Canhos & Manfio, 2001), and less than 10% of the existing microorganisms on the planet have been characterized and described (Staley, 2001). This is justified by the fact that only about 1 to 3% of microorganisms can be cultivated under laboratory conditions (Streit & Schmitz, 2004). Regardless, culture-dependent methods continue to be used, because they enable *in vitro* and *in vivo* experiments with the obtained isolates (Hill *et al.*, 2000).*

Microorganisms Biotechnological Potential

*In biotechnology, the diversity and biochemical potential of microorganisms is essential as a source of various products with applications in virtually all industrial sectors (Figure 6) (Demain & Adrio, 2008). Microbial products are used, for example, as antibiotics, tumor agents, and immunosuppressants in pharmaceutical industries. Caves present high potential for the discovery of bioactive bacterial compounds and production of new drugs (Ghosh *et al.*, 2017).*

*Many bacteria have the ability to facilitate plant growth and development (Calvo *et al.*,*

Muitas bactérias possuem a capacidade de facilitar o crescimento e o desenvolvimento de plantas (Calvo *et al.*, 2014), podem ser utilizadas como biocontroladores e até mesmo na produção de organismos transgênicos de interesse econômico (Pereira & Martins, 2016). São empregadas como agentes de processamento alimentício e no setor da agricultura (Demain & Adrio, 2008). Bactérias também podem ser utilizadas na biolixiviação de metais (Francisco, 2007), e na biorremediação de ambientes contaminados, permitindo a remoção ou redução dos níveis de poluentes, algumas vezes gerando por meio de processos metabólicos complexos, outros subprodutos de interesse comercial (Gaylarde, 2005).

Fatores como baixo custo de produção, alta produtividade, estabilidade a temperaturas extremas, especificidade, pH ou outras condições fisiológicas fazem com que o estudo de bactérias em ambientes peculiares, como o cavernícola, seja uma alternativa em destaque na busca por novos medicamentos (Prakash *et al.*, 2013). As pressões seletivas do ambiente podem favorecer grupos de bactérias com capacidade de produção de antimicrobianos (Barton *et al.*, 2007), por exemplo, as actinobactérias, as quais têm sido amplamente encontradas nos ambientes cavernícolas (Jurado *et al.*, 2005).

Tendo em vista o contexto ecológico, o estudo da microbiota cavernícola se torna necessário, devido à escassez de pesquisas relacionadas ao tema, quando comparado aos demais estudos de biologia subterrânea. Somado a isto, a maioria dos estudos envolvendo a microbiota cavernícola se restringem a rochas carbonáticas (Barton *et al.*, 2007). Dessa forma este trabalho investiga pela primeira vez a bioprospecção e o potencial biotecnológico de bactérias da maior caverna em quartzito do Brasil, a Gruta Martiniano II. Assim sendo, pode contribuir com a realização do plano de manejo espeleológico no Parque Estadual do Ibitipoca e para a conservação da Gruta Martiniano II.

2014), can be used as biocontrollers and even in the production of transgenic organisms of economic interest (Pereira & Martins, 2016). They are employed as food processing agents and in the agricultural sector (Demain & Adrio, 2008). Bacteria can also be used in metal biolixiviation (Francisco, 2007), and in the bioremediation of contaminated environments, allowing the removal or reduction of pollutant levels, sometimes generating through complex metabolic processes, other by-products of commercial interest (Gaylarde, 2005).

*Factors such as low production cost, high productivity, stability at extreme temperatures, specificity, pH or other physiological conditions make the study of bacteria in peculiar environments, such as cave environments, a highlighted alternative in the search for new drugs (Prakash *et al.*, 2013). The selective pressures of the environment may favor groups of bacteria with antimicrobial production capacity (Barton *et al.*, 2007), for example, the actinobacteria, which have been widely found in cave environments (Jurado *et al.*, 2005).*

*In view of the ecological context, the study of cave microbiota becomes necessary, due to the scarcity of research related to the subject, when compared to other studies of subterranean biology. In addition, most studies involving cave microbiota are restricted to carbonate rocks (Barton *et al.*, 2007). This work investigates for the first time the bioprospecting and biotechnological potential of bacteria from the largest quartzite cave in Brazil, the Martiniano II Cave. Furthermore, it can contribute to the implementation of the speleological management plan in the Ibitipoca State Park and to the conservation of the Martiniano II Cave.*

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta do Material Microbiológico

Uma análise do mapa topográfico da Gruta Martimiano II foi previamente estabelecida para determinação dos pontos de relevância para a realização de coletas de solo e rochas. Foram considerados fatores fundamentais para seleção dos pontos de coletas: área fótica, área afótica, regiões secas e úmidas, isolamento geográfico, e reduzidos sinais de pisoteio. Durante as coletas, foi feita uma análise visual para caracterizar e descrever as áreas de coleta.

Foram utilizados materiais esterilizados para a coleta, como espátulas para a retirada das amostras e tubos Falcon de 50 mL para o transporte do material coletado. Para cada ponto da caverna, foram coletados pelo menos uma amostra de piso, uma de parede e uma de teto, geralmente em torno de 50 g de material sólido.

Caracterização Mineralógica

Para a caracterização mineralógica, as amostras foram moídas em cadinho com o objetivo de adequar a granulometria ($< 0,045$ mm), para realizar as análises por difração de raios X (DRX) no equipamento EMPYREAN PANalytical diffractometer, com tubo de CuK α ($\lambda = 1,5418$ angstrom), com 45 kV e corrente de 40 mA. O 2θ variou de $2-70^\circ$ com 40 segundos de tempo de análise. A interpretação dos padrões gerados foi efetuada no programa PANalytical (Bleith *et al.*, 2015).

Isolamento das Colônias Bacterianas

A partir das amostras coletadas, 1g de material foi lavado em 10 mL de água de torneira autoclavada. As soluções dos lavados foram diluídas em fatores de 1:10 e 1:100, e 100 μ L desta solução diluída foi plaqueada em placas de Petri contendo meio de cultura Luria-Bertani (LB) (Felestrino, 2017). As placas foram incubadas à temperatura de 28°C por um período de até três dias, e as colônias que apresentaram diferentes morfologias foram repicadas em novas placas de Petri contendo o mesmo meio a fim de isolá-las. Cada isolado foi preservado em meio LB líquido

MATERIALS AND METHODS

Microbiological Material Sampling

An analysis of Martimiano II Cave topographic map was previously established to determine the relevant points to collect soil and rocks. Fundamental factors for the selection of collection points were considered: photic area, aphotic area, dry and humid regions, geographic isolation, and reduced signs of trampling. During the collections, a visual analysis was made to characterize and describe the sampling areas.

Sterile materials were used for the collection, such as spatulas for removing the samples and 50 mL Falcon tubes for transporting the collected material. For each point in the cave at least one floor, one wall and one ceiling sample were collected, usually around 50 g of solid material.

Mineralogical Characterization

*For the mineralogical characterization, the samples were ground in crucible in order to adequate the granulometry (< 0.045 mm), to perform the analyses by X-ray diffraction (XRD) in EMPYREAN PANalytical diffractometer equipment, with CuK α tube ($\lambda = 1.5418$ angstrom), with 45 kV and 40 mA current. The 2θ ranged from $2-70^\circ$ with 40 seconds of analysis time. Interpretation of the generated patterns was performed in the PANalytical program (Bleith *et al.*, 2015).*

Bacterial Colonies Isolation

From the collected samples, 1g of material was washed in 10 mL autoclaved tap water. The wash solutions were diluted in factors of 1:10 and 1:100, and 100 μ L of this diluted solution was plated onto Petri dishes containing Luria-Bertani (LB) culture medium (Felestrino, 2017). The plates were incubated at a temperature of 28°C for up to three days, and the colonies that presented different morphologies were plated onto new Petri plates containing the same medium in order to isolate them. Each isolate was preserved

contendo glicerol, em uma concentração final de 15%, e estocado em freezer -20°C. Para a realização dos ensaios bioquímicos, foram geradas placas matrizes, em que foram colocados 200 µL de meio LB líquido em placas de 96 poços onde os preservados foram novamente cultivados para posterior inoculação e realização dos ensaios.

Potencial Biotecnológico

Com objetivo de testar o potencial biotecnológico dos microrganismos coletados após esses processos, no que tange o desenvolvimento de biofertilizantes e antibióticos, foram realizados os seguintes ensaios bioquímicos:

- Ensaio de fixação de nitrogênio

Partindo das placas matrizes, os isolados foram inoculados em meio de cultura Baz semi-sólido, livre de N₂, por 14 dias a 28°C, o teste foi realizado em duplicata. As bactérias que modificaram a coloração do meio de amarelo para esverdeado indicam a potencial capacidade de fixar nitrogênio (Dobereiner *et al.*, 1976).

- Ensaio de solubilização de fosfato

A capacidade de solubilização de fosfato foi avaliada, em duplicata, mediante uso do meio National Botanical Research Institute's Phosphate (NBRIP), e após 4 dias à 28°C a formação de um halo transparente ao redor da colônia indica o potencial do isolado em solubilizar fosfato (Nautiyal, 1999).

- Ensaio de inibição do crescimento bacteriano

Foram colocados 1000 µL de LB líquido e 5 µL do preservado de *Staphylococcus aureus* e *Klebsiella pneumoniae* em microtubos de 1,5 ml e para crescer no Shaker a 28°C e 180 rpm, o crescimento foi observado em dois dias. Posteriormente, 20 µL dos patógenos foram espalhados com alça de drigalsky em placas de Petri (150 x 15mm) com meio LB sólido, formando uma manta microbiana.

in LB liquid medium containing glycerol, at a final concentration of 15%, and stored in a freezer at -20°C. To perform the biochemical assays, matrix plates were generated, in which 200 µL of LB liquid medium were placed in 96-well plates where the preserved isolates were grown again for further inoculation and performance of the assays.

Biotechnological Potential

In order to test the biotechnological potential of the microorganisms collected after these processes, with regard to the development of biofertilizers and antibiotics, the following biochemical assays were performed:

- *Nitrogen Fixation Assay*

*Starting from the matrix plates, the isolates were inoculated on semi-solid, N₂-free Baz culture medium for 14 days at 28°C, the test was performed in duplicate. Bacteria that changed the coloration of the medium from yellow to greenish indicate the potential ability to fix nitrogen (Dobereiner *et al.*, 1976).*

- *Phosphate solubilization test*

The phosphate solubilizing capacity was evaluated, in duplicate, using National Botanical Research Institute's Phosphate solubilizing medium (NBRIP), and after 4 days at 28°C the formation of a transparent halo around the colony indicates the potential of the isolate to solubilize phosphate (Nautiyal, 1999).

- *Bacterial Growth Inhibition Assay*

*1000 µL of liquid LB and 5 µL of the preserved *Staphylococcus aureus* and *Klebsiella pneumoniae* were placed in 1.5 ml microtubes to grow in the Shaker at 28°C and 180 rpm. Growth was observed within 2 days. Subsequently, 20 µL of the pathogens were spread with drigalsky spatula into Petri dishes (150 x 15 mm) with solid LB medium, forming a microbial blanket.*

Partindo da matriz de isolados bacterianos, foram colocados 100 µL dos isolados em placas de 96 poços e com um multi-inoculador os isolados da caverna foram inoculados nas placas de Petri. O crescimento e a formação de halos foram observados por dois dias, os halos indicam a inibição do crescimento das bactérias patogênicas e o experimento foi realizado em duplicata. Os halos de inibição do isolado de maior potencial foram medidos com um paquímetro. Apenas o isolado que apresentou o melhor resultado na inibição passou pelos próximos testes.

- Ensaio de caracterização do composto inibitório

Em placa de Petri (90 x 15mm) com meio LB, foi colocado celofane semipermeável autoclavado e espalhou-se com a alça de drigalsky 200 µL do isolado de maior interesse sobre o celofane. O crescimento foi observado por 1 dia a 28 °C, após o crescimento, o celofane com o isolado foi retirado da placa e descartado. No centro da placa adicionou-se 2 µL da bactéria patogênica, o crescimento foi observado por 2 dias a 28 °C. Todo o experimento foi feito em duplicata e um menor crescimento dos patógenos em relação às placas controle indica a inibição do crescimento bacteriano por um composto produzido anteriormente pelo isolado bacteriano de interesse biotecnológico. Este método foi modificado do trabalho de Nourozian *et al.* (2006).

- Ensaio de caracterização quanto à motilidade

O isolado foi cultivado em meio LB semi-sólido (0,3% de ágar) por 2 dias a 28°C, em duplicata. O crescimento em toda a placa de Petri indica a motilidade por swimming (Sperandio *et al.*, 2003).

Starting with the matrix of bacterial isolates, 100 µL of the isolates were placed in 96-well plates and with a multi-inoculator the cave isolates were inoculated into the Petri plates. The growth and formation of halos were observed for two days, the halos indicate the inhibition of the growth of the pathogenic bacteria. The experiment was performed in duplicate. The inhibition halos of the isolate with the highest potential were measured with a caliper. Only the isolate with the best inhibition result went through the next tests.

- *Inhibitory compound characterization assay*

*In a Petri dish (90 x 15 mm) with LB medium, autoclaved semipermeable cellophane was placed and 200 µL of the isolate of greatest interest was spread on it with a drigalsky spatula. Growth was observed for 1 day at 28 °C. After growth, the cellophane with the isolate was removed from the plate and discarded. In the center of the plate 2 µL of the pathogenic bacteria was added, growth was observed for 2 days at 28 °C. The whole experiment was done in duplicate and a lower growth of the pathogens compared to the control plates indicates inhibition of bacterial growth by a compound previously produced by the bacterial isolate of biotechnological interest. This method was modified from the work of Nourozian *et al.* (2006).*

- *Motility characterization assay*

*The isolate was grown on semi-solid LB medium (0.3% agar) for 2 days at 28°C in duplicate. Growth throughout the Petri dish indicates swimming motility (SPERANDIO *et al.*, 2003).*

- Ensaio de caracterização de Gram

Seguindo o protocolo do Ministério da Saúde (1997), o esfregaço foi preparado transferindo 20 µL do isolado bacteriano para lâminas previamente limpas e flambadas e fixado na chama do bico de bussen. O esfregaço foi coberto com o corante cristal violeta-de-metila por um minuto e lavado com água destilada; posteriormente, o esfregaço foi coberto com lugol diluído (1/20) por um minuto, foi lavado com água destilada e com etanol 95 %, descolorando-a. Após este processo, o esfregaço foi coberto com fucsina por 30 segundos e lavado com água destilada.

Finalizados os processos de coloração e descoloração, as lâminas secaram ao ar livre e o resultado foi observado no microscópio óptico em lente objetiva de imersão (100 X). A coloração rosa das bactérias as caracteriza como Gram-negativas e a coloração roxa como Gram-positivas.

- Identificação do isolado 14

Foi realizado o sequenciamento do gene 16S usando NGS (Sequenciamento de Nova Geração).

RESULTADOS

Caracterização Mineralógica

Foi realizada a difração de raio X para a caracterização mineralógica dos pontos de coleta (Tabela 1). Os minerais presentes nas amostras são o quartzo, muscovita, a caulinita e a gibbsita. Os resultados completos da difração de raio X podem ser observados nos apêndices A à L.

- Gram characterization assay

Following the protocol of the Ministry of Health (1997), the smear was prepared by transferring 20 µL of the bacterial isolate to previously cleaned and flamed slides and fixed in the bunsen burner flame. The smear was covered with crystal methyl violet dye for 1 minute and washed with distilled water; subsequently, the smear was covered with diluted lugol (1/20) for 1 minute, was washed with distilled water and with 95 % ethanol, bleaching it. After this process the smear was covered with fuchsin for 30 seconds and washed with distilled water.

After the staining and decolorization processes were completed, the slides were dried in the open air and the result was observed under the light microscope with an immersion objective (100 X). Pink staining of the bacteria characterizes them as Gram-negative and purple staining as Gram-positive.

- Identification of isolate 14

Sequencing of the 16S gene was performed using NGS (Next Generation Sequencing).

RESULTS

Mineralogical Characterization

X-ray diffraction was performed for the mineralogical characterization of the collection points (Table 1). The minerals present in the samples are quartz, muscovite, kaolinite and gibbsite. The complete X-ray diffraction results can be seen in Appendices A to L.

Tabela 1: Resultados da difratometria de raio X, demonstrando as fases minerais observadas em cada amostra.

Amostra		Mineral			
		Quartzo	Muscovita	Caulinita	Gibbsita
ÁREA 1	Lateral 1	X	X	X	
	Piso 1	X	X		
	Teto 1	X	X	X	
ÁREA 2	Lateral 2	X	X	X	X
	Piso 2	X	X	X	
	Teto 2	X	X	X	
ÁREA 3	Lateral 3	X	X	X	X
	Piso 3	X	X	X	X
	Teto 3	X	X	X	X
ÁREA 4	Lateral 4	X	X	X	
	Piso 4	X	X	X	
	Teto 4	X	X	X	

Table 1: X-ray diffractometry results, showing the mineral phases observed in each sample.

Sample		Mineral			
		Quartz	Muscovite	Kaolinite	Gibbsite
AREA 1	Wall 1	X	X	X	
	Floor 1	X	X		
	Ceiling 1	X	X	X	
AREA 2	Wall 2	X	X	X	X
	Floor 2	X	X	X	
	Ceiling 2	X	X	X	
AREA 3	Wall 3	X	X	X	X
	Floor 3	X	X	X	X
	Ceiling 3	X	X	X	X
AREA 4	Wall 4	X	X	X	
	Floor 4	X	X	X	
	Ceiling 4	X	X	X	

Isolados Bacterianos e Descrição das Áreas de Coleta

Foram produzidas descrições espeleológicas (Tabela 2) das áreas de coleta. A partir do cultivo em meio LB das colônias bacterianas, obteve-se um total de 72 isolados, que geraram um banco de isolados bacterianos (Tabela 2).

Bacterial Isolates and Sampling Areas Description

Speleological descriptions (Table 2) of the collection areas were produced. From the bacterial colonies culture in LB medium, a total of 72 isolates were obtained, which generated a bank of bacterial isolates (Table 2).

Tabela 2- Descrição das áreas de coleta e correlação com os isolados bacterianos.

ÁREA DE COLETA	ZONA DE INCIDÊNCIA LUMINOSA	DESCRIÇÃO DA ÁREA	PONTO DE COLETA	ISOLADOS	ISOLADOS POR ÁREA
1	Zona de entrada/ Zona crepuscular	Boca da Gruta Martimiano II, conduto com desenvolvimento em quartzito grosseiro sacaroidal, com serapilheira depositada no piso, resultando em maior concentração de matéria orgânica.	Piso	4	17
			Teto	6	
			Parede	7	
2	Zona profunda	Conduto com teto e parede se desenvolvendo em quartzito fino feldspático, com presença de escorrimentos, marcando percolação de água próximo ao local de coleta e baixo aporte energético.	Piso	5	18
			Teto	5	
			Parede	8	
3	Zona profunda	Salão dos espeleotemas vermelhos, com desenvolvimento em quartzito grosseiro sacaroidal, com percolação de água constante.	Piso	12	16
			Teto	3	
			Parede	1	
4	Zona profunda	Conduto com teto e piso com desenvolvimento em quartzito grosseiro sacaroidal e parede em fino feldspático, próxima a fluxo de água, com presença de matéria orgânica carregada pelo riacho.	Piso	10	21
			Teto	6	
			Parede	5	
TOTAL DE ISOLADOS					72

Table 2- Sampling areas description and correlation with bacterial isolates.

SAMPLING AREA	INCIDENCE OF LIGHT ZONE	AREA DESCRIPTION	SAMPLING POINT	ISOLATES	ISOLATES PER AREA
1	Entry zone/ Twilight zone	Martiniano II Cave entrance, conduit with development in coarse sacaroidal quartzite, with plant litter deposited on the floor resulting in higher concentration of organic matter	Floor Ceiling Wall	4 6 7	17
2	Deep Zone	Conduit with ceiling and wall developing in fine feldspathic quartzite, with presence of runoff marking percolation of water near the collection site and low organic matter input.	Floor Ceiling Wall	5 5 8	18
3	Deep Zone	Red speleothems hall, developed in coarse sacaroidal quartzite, with constant water percolation	Floor Ceiling Wall	12 3 1	16
4	Deep Zone	Conduit with ceiling and floor development in coarse sacaroidal quartzite and wall in fine feldspathic quartzite, near water flow, with presence of organic matter carried by the stream.	Floor Ceiling Wall	10 6 5	21
TOTAL NUMBER OF ISOLATES					72

Na Tabela 2, é possível observar que a área 4 apresentou maior número de colônias isoladas, tal fato pode ser explicado pela proximidade da área a uma drenagem ativa, por onde ocorre o carreamento de matéria orgânica e outros elementos do ambiente externo para dentro da caverna. Sendo que, segundo (Gilbert *et al* 1994), os cursos d'água são um dos principais transportadores de recursos alimentares do ambiente epígeo para o ambiente hipógeo.

*In Table 2, it is possible to observe that area 4 presented the highest number of isolated colonies. This fact can be explained by the proximity of the area to an active drainage, through which organic matter and other elements from the external environment are carried into the cave. According to (Gilbert *et al* 1994), water courses are one of the main transporters of food resources from the epigeal to the hypogeal environment.*

Potencial Biotecnológico

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios bioquímicos realizados para o desenvolvimento de novos biofertilizantes e antibióticos.

- Fixação de nitrogênio

No ensaio de fixação de nitrogênio, três isolados bacterianos foram capazes de realizar o processo de fixação de nitrogênio, como é possível observar pela mudança de coloração no meio de cultivo (Figura 3). O isolado 24, coletado no teto da entrada da caverna, área 1; o isolado 18, coletado no piso da área 4; e o isolado 25, coletado no teto da área 1.

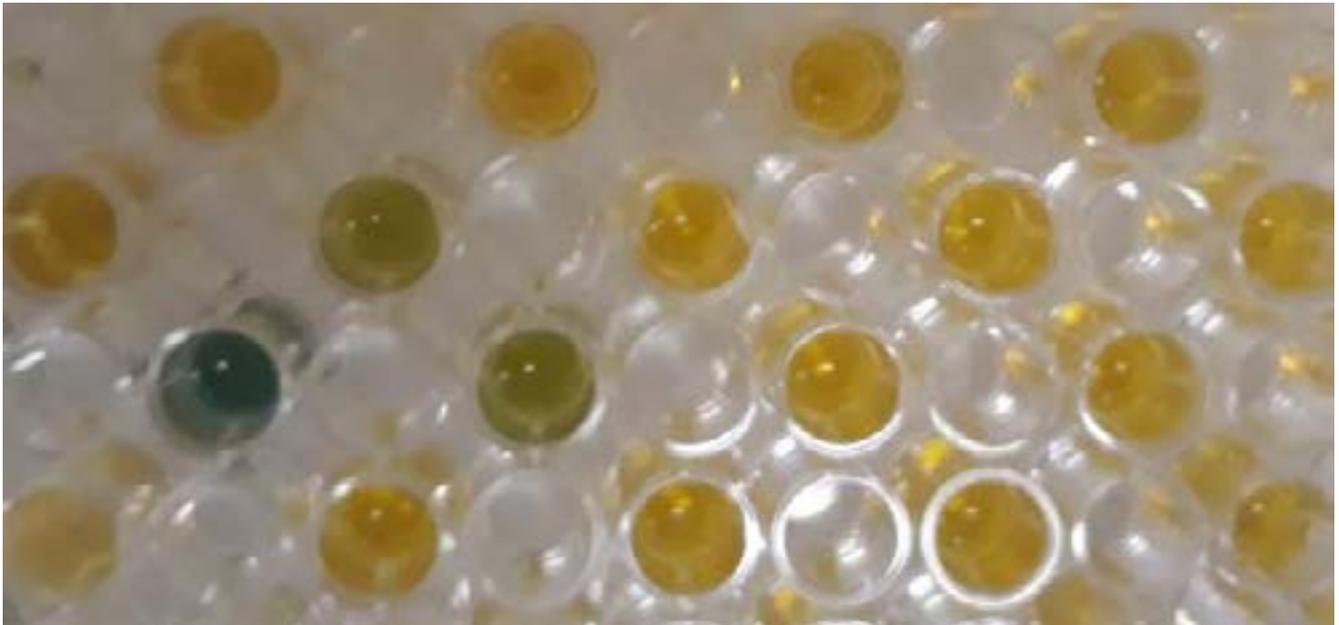


Figura 3 - Ensaio de fixação de nitrogênio, mostrando resultado positivo para três isolados bacterianos (coloração esverdeada).

- Solubilização de fosfato

No ensaio de solubilização de fosfato, o isolado bacteriano 52, coletado na parede da área 4, foi o único que apresentou a capacidade de solubilizar fosfato (Figura 4).

Biotechnological Potential

In this topic the results of the biochemical tests performed for the development of new biofertilizers and antibiotics are presented.

- Nitrogen Fixation

In the nitrogen fixation assay three bacterial isolates were able to perform the nitrogen fixation process, as it is possible to observe by the change of coloration in the culture medium (Figure 3). Isolate 24, collected on the ceiling of the cave entrance in area 1; isolate 18, collected on the floor of area 4; and isolate 25, collected on the ceiling of area 1.

Figure 3 - Nitrogen fixation assay, showing positive results for three bacterial isolates (greenish coloration).

- Phosphate solubilization

In the phosphate solubilization assay, bacterial isolate 52, collected from area 4 wall, was the only one that showed the ability to solubilize phosphate (Figure 4).



Figura 4 - Ensaio de solubilização de fosfato, com formação de halo em um dos isolados microbianos, o que indica resultado positivo para o ensaio.

Figure 4 - Phosphate solubilization assay, with halo formation in one of the microbial isolates, indicating a positive result.

- Inibição do crescimento bacteriano

Os isolados 13, 23, 15, 43 e 49 apresentaram inibição do crescimento da bactéria patogênica *Klebsiella pneumoniae* e o isolado 14 foi capaz de inibir o crescimento de *K. pneumoniae* e *Staphylococcus aureus*.

No teste de inibição em duplicata do isolado 14 sobre o crescimento dos dois patógenos (Figura 5), os halos de inibição foram medidos, sendo que para *S. aureus* os halos de inibição foram de 2,24 mm e 3,95 mm e para *K. pneumoniae* os halos medidos foram de 0,31 mm e 0,63 mm.

- Bacterial growth inhibition

Isolates 13, 23, 15, 43 and 49 showed growth inhibition of the pathogenic bacteria *Klebsiella pneumoniae* and isolate 14 was able to inhibit the growth of *K. pneumoniae* and *Staphylococcus aureus*.

In the isolate 14 duplicate inhibition test of the growth of the two pathogens (Figure 5), the inhibition halos were measured. For *S. aureus* the inhibition halos were 2.24 mm and 3.95 mm and for *K. pneumoniae* the measured halos were 0.31 mm and 0.63 mm.

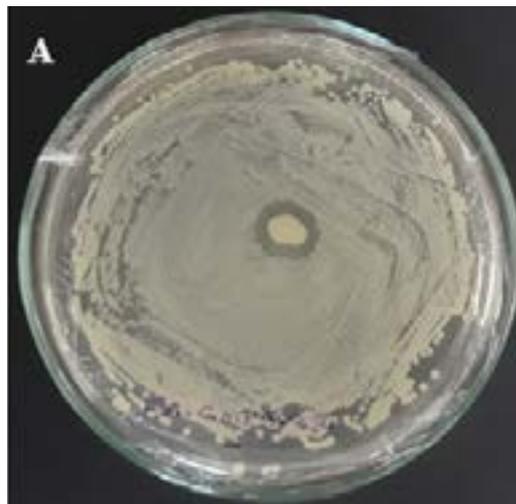
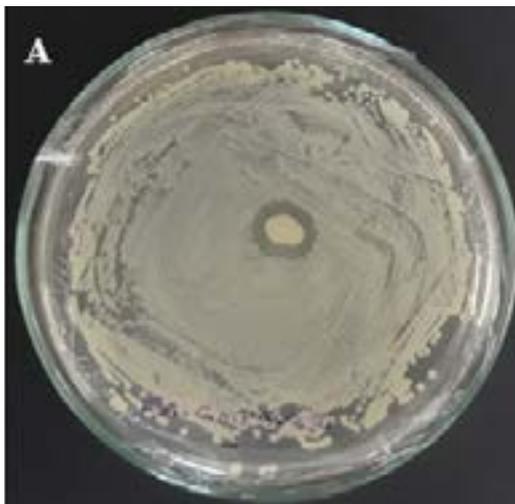


Figura 5 - Ensaio de inibição do isolado 14 sobre o crescimento dos patógenos. A) Formação do halo de inibição de *Staphylococcus aureus*; B) Formação do halo de inibição de *Klebsiella pneumoniae*.

Figure 5 - Isolate 14 pathogens growth inhibition assay. A) *Staphylococcus aureus* inhibition halo formation; B) *Klebsiella pneumoniae* inhibition halo formation.

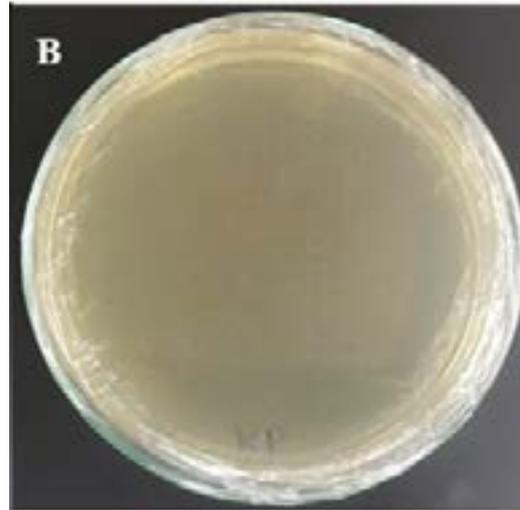
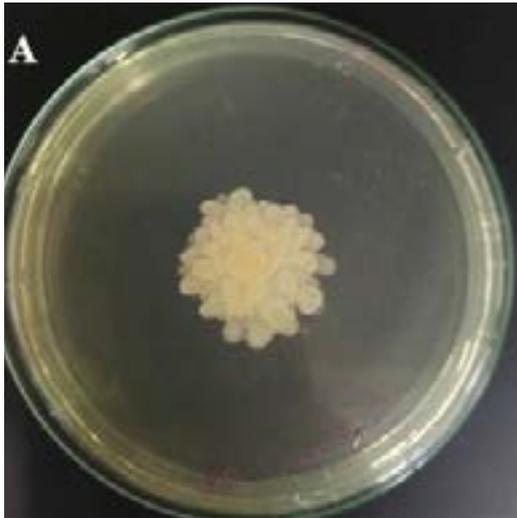


Figura 6 – Ensaio de inibição do crescimento de *Klebsiella pneumoniae* por compostos liberados pelo isolado 14. A) Placa controle com crescimento normal de *K. pneumoniae*; B) Placa com os compostos liberados pelo isolado 14 mostrando a inibição total do crescimento de *K. pneumoniae*.

Figure 6 – *Klebsiella pneumoniae* growth inhibition assay with compounds released from isolate 14. A) Control plate with normal *K. pneumoniae* growth; B) Plate with the compounds released by isolate 14 showing total inhibition of *K. pneumoniae* growth

- Caracterização do composto inibitório

- Characterization of the inhibitory compound

No teste de inibição em que os patógenos foram inoculados sobre as placas onde previamente o isolado 14 cresceu sobre celofane semipermeável, ocorreu a inibição total do crescimento de *K. pneumoniae* (Figura 6) e a inibição total do crescimento da bactéria *S. aureus* (Figura 7).

In the inhibition test in which the pathogens were inoculated onto the plates where isolate 14 had previously grown on semipermeable cellophane, there was complete inhibition of *K. pneumoniae* growth (Figure 6) and complete inhibition of *S. aureus* growth (Figure 7).

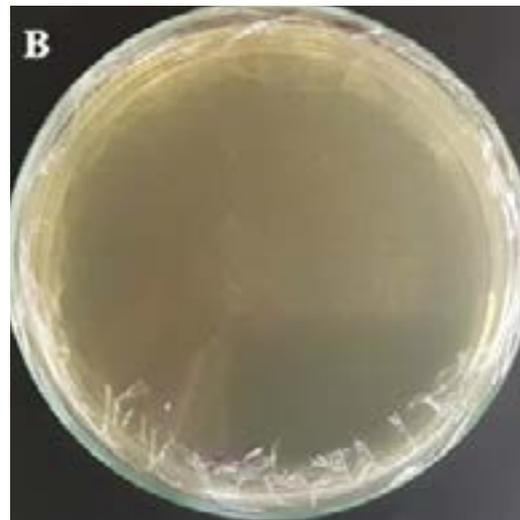
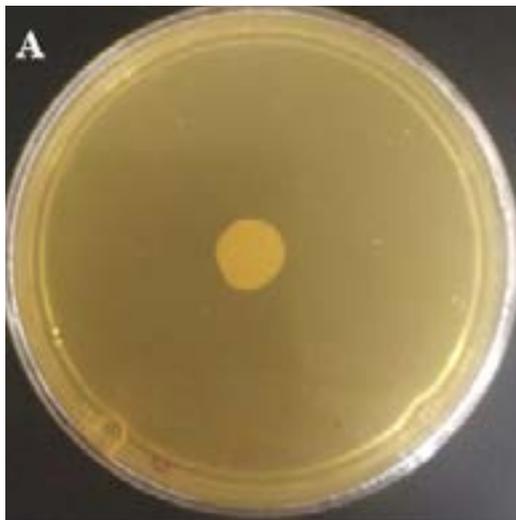


Figura 7 – Ensaio de inibição do crescimento de *Staphylococcus aureus* por compostos liberados pelo isolado 14. A) Placa controle com crescimento normal de *S. aureus*; B) Placa com os compostos liberados pelo isolado 14 mostrando a inibição total do crescimento de *S. aureus*.

Figure 7 – *S. aureus* growth inhibition assay with compounds released from isolate 14. A) Control plate with normal *S. aureus* growth; B) Plate with the compounds released by isolate 14 showing total inhibition of *S. aureus* growth

- Caracterização de motilidade do isolado

No ensaio de caracterização do isolado 14 quanto à motilidade, a bactéria apresentou crescimento espalhado por toda placa, o que indica resultado positivo.

- Caracterização de Gram

A coloração rosa do isolado 14 no teste de coloração de Gram o classifica como Gram-negativo.

- Indetificação do isolado 14

O isolado 14 foi identificado como um *Peribacillus*.

DISCUSSÃO

Lima (2017) aponta que o desenvolvimento da gruta acontece devido a uma variação litológica, a caracterização mineral foi realizada para investigar uma possível diferença na composição mineral dos diferentes pontos amostrais. Embora tal variação litológica seja observada, as análises realizadas não apresentaram diferenciação suficiente entre a composição mineralógica das amostras, o que impossibilitou correlacioná-las com a diversidade dos isolados bacterianos.

No entanto, os dados obtidos registram paridade com as descrições feitas por Pinto & Grossi-Sad (1991), que, a partir de análises pelo microscópio de luz refletida, descrevem os quartzitos presentes nas Serra do Ibitipoca como constituídos de 95 % de quartzo e 5 % de muscovita. Embora a caulinita e a gibbsita não sejam citadas nas descrições dos autores, possivelmente são resultantes da alteração da muscovita, já que suas formações estão relacionadas com o intemperismo de minerais aluminosos.

Cada área apresenta peculiaridades, como incidência e ausência de luz, diferenças no aporte energético, drenagem ativa e percolação de água, o que proporciona condições variadas para a microbiota local. As colônias isoladas neste trabalho possibilitaram a criação do primeiro banco de isolados bacterianos da maior caverna em quartzito do Brasil, a Gruta Martimiano II, que ficará acessível para novas pesquisas no laboratório.

- *Isolate motility characterization*

In the motility characterization assay of isolate 14, the bacterium showed growth spread over the whole plate, indicating a positive result.

- *Gram Characterization*

The pink coloration of isolate 14 in the Gram stain test classifies it as Gram-negative.

- *Isolate 14 identification*

*Isolate 14 was identified as a *Peribacillus*.*

DISCUSSION

Lima (2017) points out that the cave development happens due to a lithological variation. The mineral characterization was performed to investigate a possible difference in the mineral composition of the different sample points. Although such lithological variation is observed, the analyses performed did not show enough differentiation between the mineralogical composition of the samples, making it impossible to correlate them with the diversity of the bacterial isolates.

Nevertheless, the data obtained coincide with the descriptions made by Pinto & Grossi-Sad (1991), who, from analyses by reflected light microscope, describe the quartzite present in the Serra do Ibitipoca as constituted of 95% quartz and 5% muscovite. Although kaolinite and gibbsite are not mentioned in the authors' descriptions, they possibly result from the alteration of muscovite, since their formations are related to the weathering of aluminous minerals.

Each area presents peculiarities, such as incidence and absence of light, differences in energy input, active drainage and water percolation, which provide varied conditions for the local microbiota. The colonies isolated in this work enabled the creation of the first bank of bacterial isolates from the largest quartzite cave in Brazil, the Martimiano II Cave, which will be accessible for further research in the laboratory.

A bioprospecção de microrganismos e seu potencial biotecnológico pode apresentar grande importância para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, no que tange ao desenvolvimento de fertilizantes biológicos. Além disso, o estudo de compostos com potencial para desenvolvimento de novos antibióticos é de suma importância para os avanços da medicina, farmácia e para o progresso e bem-estar dos seres humanos.

Segundo Pajares e Bohannan (2016), a microbiota do solo desempenha um papel fundamental nos processos do ciclo do nitrogênio, que é um elemento fundamental para todos os organismos. A fixação biológica do nitrogênio consiste em um processo bioquímico de redução do nitrogênio gasoso para amônia, que pode ser absorvida pelas plantas. Três isolados bacterianos foram capazes de fixar nitrogênio, esta capacidade metabólica, indica um potencial para desenvolvimento de biofertilizantes, entretanto necessita de estudos mais específicos para viabilizar tal aplicabilidade.

O fósforo é o segundo elemento mais importante para as plantas após o nitrogênio, por ser fundamental em praticamente todos os processos metabólicos das plantas, como a respiração e a fotossíntese (Khan *et al.*, 2010). Apesar de sua abundância no solo, encontra-se indisponível para a absorção das plantas (Sharma *et al.*, 2013). Menos que 5% do teor de fósforo de solos é biodisponível para as plantas. Diante disso, estratégias para melhorar a disponibilidade e absorção de fosfato podem contribuir significativamente para o desenvolvimento das plantas (Bulgarelli, 2013). No ensaio de solubilização de fosfato, o isolado bacteriano GML4.14 pode apresentar potencial como fertilizante biológico, devido ao resultado positivo e com estudos mais específicos pode-se avaliar este potencial.

A descoberta dos antibióticos foi uma revolução para a humanidade, mas a resistência de microrganismos a antibióticos se tornou um grande problema social, e econômico, sendo que algumas bactérias já são resistentes a todos os antibióticos conhecidos, o que causa a morte de muitas pessoas (Aminov, 2010). Devido a isso, é de extrema importância a busca por novos antibióticos.

The bioprospecting of microorganisms and their biotechnological potential can be of great importance for the development of sustainable agriculture, with regard to the development of biological fertilizers. In addition, the study of compounds with potential for the development of new antibiotics is of paramount importance for the advances in medicine, pharmacy, and for humans progress and well-being.

According to Pajares and Bohannan (2016), soil microbiota play a key role in the processes of the nitrogen cycle, which is a fundamental element for all organisms. Biological nitrogen fixation consists of a biochemical process of reducing gaseous nitrogen to ammonia, which can be absorbed by plants. Three bacterial isolates were able to fix nitrogen. This metabolic capacity indicates a potential for development of biofertilizers. However, to enable such applicability, more specific studies are required.

*After nitrogen, phosphorus is the second most important element for plants because it is essential in virtually all plants metabolic processes, such as respiration and photosynthesis (Khan *et al.*, 2010). Despite its abundance, less than 5% of soils phosphorus content is bioavailable for plant uptake (Sharma *et al.*, 2013). Therefore, strategies to improve the availability and uptake of phosphate can significantly contribute to plant development (Bulgarelli, 2013). In the phosphate solubilization test, the bacterial isolate GML4.14 may have potential as a biological fertilizer, due to the positive result and with more specific studies this potential can be evaluated.*

The discovery of antibiotics was a revolution for mankind, but the resistance of microorganisms to antibiotics has become a major social and economic problem. Many people die because of bacteria that are already resistant to all known antibiotics, which makes the search for new antibiotics of utmost importance (Aminov, 2010).

K. pneumoniae belongs to the Enterobacteriaceae family, is Gram-negative and is naturally

A bactéria *K. pneumoniae* pertence à família Enterobacteriaceae, é Gram-negativa e está presente naturalmente no trato digestivo e respiratório humano e de animais (Brooks *et al.*, 2005). Quando patogênica, a *K. pneumoniae* é o agente causador de diversas doenças, como pneumonia, infecção do trato urinário, abscessos no fígado e infecções em feridas (Rahamathulla *et al.*, 2016). Este patógeno causa um grande impacto no setor da saúde e segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), é uma das nove bactérias resistentes a diversos antibióticos, juntamente com a *S. aureus* (OMS, 2014).

Por outro lado, *S. aureus* é Gram-positiva, pertence à família Micrococcaceae, e o ser humano é um reservatório natural desta bactéria (Lowy, 1998). *S. aureus* é um patógeno oportunista e pode causar infecções simples e infecções severas, como a bacteremia, septicemia e endocardite. Além disso, a multirresistência a antibióticos é alarmante para os setores da saúde (Lowy, 1998).

O resultado positivo para a inibição direta de *K. pneumoniae* pode estar vinculada com a destruição da parede celular do alvo, sendo que os mesmos não foram capazes de inibir o crescimento de uma bactéria Gram-positiva, com exceção do isolado 14.

O isolado 14 (*Peribacillus*) foi capaz de inibir o crescimento de ambos patógenos testados o que pode estar relacionado a outros mecanismos de inibição, como por exemplo o bloqueio da expressão e da tradução (Cotter *et al.*, 2013) e a inibição da divisão celular (Bisson-Filho *et al.*, 2015) em *S. aureus* e *K. pneumoniae*.

Segundo Nourozian (2006), a inibição percentual da área do crescimento do patógeno deveria ser calculada, mas o composto antimicrobiano produzido pelo isolado 14, foi capaz de impedir totalmente o crescimento de *S. aureus* e *K. pneumoniae*.

O isolado cresceu sobre o celofane e foi retirado da placa de Petri antes da inoculação dos patógenos, o que pode indicar que a inibição ocorre com a liberação de um composto secundário difusível no ambiente (Orakci *et*

present in the digestive and respiratory tracts of humans and animals (Brooks et al., 2005). Pathogenic K. pneumoniae is the causer of several diseases, such as pneumonia, urinary tract infection, liver abscesses, and wound infections (Rahamathulla et al., 2016). This pathogen causes a great impact on the health-care sector and according to the World Health Organization (WHO) is one of the 9 bacteria resistant to various antibiotics, along with S. aureus (WHO, 2014).

On the other hand, S. aureus is Gram-positive, belongs to the Micrococcaceae family, and humans are a natural reservoir of this bacterium (Lowy, 1998). S. aureus is an opportunistic pathogen and can cause simple infections and severe infections such as bacteremia, sepsis, and endocarditis. Moreover, multidrug resistance to antibiotics is alarming to health care sectors (Lowy, 1998).

The positive result for the direct inhibition of K. pneumoniae may be linked to the destruction of the target cell wall, as they were not able to inhibit the growth of a Gram-positive bacterium, with the exception of isolate 14.

Isolate 14 (Peribacillus) was able to inhibit both pathogens growth. This may be related to other inhibition mechanisms, such as blocking expression and translation (Cotter et al., 2013) and inhibiting cell division (Bisson-Filho et al., 2015) in S. aureus and K. pneumoniae.

According to Nourozian (2006), the percentage inhibition of pathogen growth area should be calculated. However, the antimicrobial compound produced by isolate 14, was able to completely prevent the S. aureus and K. pneumoniae growth.

The isolate grew on the cellophane and was removed from the Petri dish before inoculation of the pathogens, which may indicate that the inhibition occurs with the release of a secondary compound diffusible in the environment (Orakci et al., 2010). Moreover, the release of the inhibitory compound indicates that it is naturally produced, and no competitive stimulus with another microorganism is

al., 2010). Além disso, a liberação do composto inibitório indica que o mesmo é produzido naturalmente, não sendo necessário um estímulo competitivo com outro microrganismo, o que é uma característica facilitadora para o processo de desenvolvimento e para a produção em larga escala de um antibiótico.

Segundo Harshey (2003), as bactérias desenvolveram diferentes formas de locomoção em superfícies úmidas, como por exemplo o deslizamento, espasmos e a natação, sendo que a motilidade é uma vantagem adaptativa em diversos ambientes, por propiciar maior sucesso em relações antagônicas com outros microrganismos e facilitar a busca por nutrientes. Além disso, a motilidade das bactérias confere uma vantagem adicional na resistência contra antimicrobianos (BUTLER, 2010) e pode melhorar a ação antimicrobiana do isolado 14, já que as colônias possuem a capacidade de se mover no ambiente na competição com os microrganismos patogênicos.

Segundo Koch (1992), as paredes celulares de bactérias Gram-negativas são resistentes o suficiente para suportar temperaturas e PHs extremos e são elásticas. Além disso, são fortes a ponto de suportar até 3 atm de pressão de turgor (Koch, 1998). Essas características protegem o conteúdo celular e podem estar relacionados com o sucesso evolutivo dessas bactérias (Beveridge, 1999).

CONCLUSÃO

Esta pesquisa gerou o primeiro banco de isolados bacterianos da Gruta Martimiano II e abriu a perspectiva para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para o potencial biotecnológico de bactérias desta gruta e de outras ainda não estudadas, sendo que o mapa topográfico também servirá como base para pesquisas, em diversas áreas de concentração, a serem realizadas na Gruta Martimiano II. De acordo com os resultados da difração de raio X, a composição mineralógica parece não influenciar na diversidade microbiana entre as áreas.

required, which is a facilitating feature for the development process and for the large-scale production of an antibiotic.

According to Harshey (2003), bacteria have developed different locomotion forms on wet surfaces, such as sliding, spasming, and swimming. Motility is an adaptive advantage in various environments, because it provides greater success in antagonistic relationships with other microorganisms and facilitates the search for nutrients. Moreover, the motility of bacteria confers an additional advantage in resistance against antimicrobials (Butler, 2010) and can improve the antimicrobial action of isolate 14, since the colonies have the ability to move in the environment in competition with pathogenic microorganisms.

According to Koch (1992), the cell walls of Gram-negative bacteria are elastic and are tough enough to withstand extreme temperatures and pHs. In addition, they are strong enough to withstand up to 3 atm of turgor pressure (Koch, 1998). These characteristics protect the cell contents and may be related to the evolutionary success of these bacteria (Beveridge, 1999).

CONCLUSION

This research generated the first bank of bacterial isolates from the Martimiano II Cave and opened the perspective for the development of researches focused on the biotechnological potential of cave bacteria. The topographic map will also serve as a basis for research in several concentration areas to be carried out in the Martimiano II Cave. According to the X-ray diffraction results, the mineralogical composition does not seem to influence the microbial diversity between the areas.

*The low number of isolates with biofertilizing capacity can be justified by the absence of plant roots that can penetrate the cave. On the other hand, isolate 14, *Peribacillus*, is promising for the development of a new antibiotic. Further-*

O baixo número de isolados com capacidade biofertilizante pode ser justificado pela ausência de raízes de plantas que consigam penetrar na caverna. Por outro lado, o isolado 14, *Peribacillus*, é promissor quanto ao desenvolvimento de um novo antibiótico. Além disso, este estudo pode incentivar a conservação das cavernas, que se destacam por sua fauna especializada, feições exuberantes e por serviços ecossistêmicos, como os demonstrados nesta pesquisa, dado que a descoberta de uma nova droga dentro de uma caverna pode representar uma forma de retorno econômico, oriundo da conservação desse ecossistema único.

more, this study may encourage the conservation of caves, which are noted for their specialized fauna, lush features, and ecosystem services, such as those demonstrated in this research. Given that, the discovery of a new drug inside a cave, may represent a form of economic return from the conservation of this unique ecosystem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMINOV, R. I. A brief history of the antibiotic era: lessons learned and challenges for the future. *Frontiers in microbiology*, v. 1, p. 134, 2010.

BARBOSA, F. E. et al. *Alcaligenes faecalis* associated with *Mimosa calodendron* rhizosphere assist plant survival in arsenic rich soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, v. 17, n. 4, p. 1102-1115, 2017.

BARTON, H. A. et al. The impact of rock geochemistry on bacterial community structure in oligotrophic cave environments. *International Journal of Speleology*, v.36, n. 2, p. 93-104, 2007.

BENTO, L. C. M.; TRAVASSOS, L. E. P.; RODRIGUES, S. C. Considerações sobre as cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 16, n. 54, 2015.

BEVERIDGE, T. J. Structures of gram-negative cell walls and their derived membrane vesicles. *Journal of bacteriology*, v. 181, n. 16, p. 4725-4733, 1999.

BISSON-FILHO, A.W. et al. FtsZ filament capping by MciZ, a developmental regulator of bacterial division. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, n. 17, p. E2130-E2138, 2015.

BLEITH, P. et al. In situ X-ray diffraction characterisation of Fe₀. 5TiOPO₄ and Cu₀. 5TiOPO₄ as electrode material for sodium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, v. 176, p. 18-21, 2015.

BROOKS, G.F.; BUTEL, J.S.; MORSE, S.A. *Medical Microbiology*. Edition 1, Jakarta, 2005.

BULGARELLI, D.; SCHLAEPPI, K.; SPAEPEN, S.; VER LOREN VAN THEMAAT, E. & SCHULZE-LEFERT, P. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annu Rev Plant Biol* 64, 807-838, 2013.

BUTLER, M. T.; WANG, Q.; HARSHEY, R. M. Cell density and mobility protect swarming bacteria against antibiotics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107, n. 8, p. 3776-3781, 2010.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, v. 383, n. 1, p. 3-41, October 01 2014.

CANDIROGLU, B.; GUNGOR, N. D. Cave Ecosystems: Microbiological View. *European Journal of Biology*, v. 76, n. 1, p. 36-42, 2017.

CANHOS, V. P.; MANFIO, G. P. Recursos Microbiológicos para Biotecnologia, 2001.

COTTER, P. D.; ROSS, R. P.; HILL, C. Bacteriocins—a viable alternative to antibiotics?. *Nature Reviews Microbiology*, v. 11, n. 2, p. 95, 2013.

CULVER, D.C. *Cave Life. Evolution and Ecology*. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts and London, England. 189 pp, 1982.

DEMAIN, A. L.; ADRIANO, J. L. Contributions of microorganisms to industrial biology. *Mol Biotechnol*, v. 38, n. 1, p. 41-55, Jan 2008.

DOBEREINER, J.; MARRIEL, I. E.; NERY, M. Ecological distribution of *Spirillum lipoferum* Beijerinck. *Can J Microbiol*, v. 22, n. 10, p. 1464-73, Oct 1976.

FERREIRA, R. L. *A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, R.L. & MARTINS, R.P. Guano de Morcegos: fonte de vida em cavernas. *Ciência Hoje*, V.25, n.146, p.34-40, 1999.

FERREIRA, R.L. & POMPEU, P.S. Fatores que influenciam a riqueza e a diversidade da fauna associada a depósitos de guano na Gruta Taboa, Sete Lagoas, MG, Brasil. *O Carste*, V.9, n.2, p.30-33, 1997.

FERREIRA, R.L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. *O Carste* 17(3):106-115, 2005.

FRANCISCO JR, W.; BEVILAQUA, D.; GARCIA JR, O. Microbiological oxidative dissolution of a complex mineral sample containing pyrite (FeS₂), pyrrhotite (Fe_{1-x}S) and molybdenite (MoS₂). *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1095-1099, 2007.

GAYLARDE, C.C.; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, v.34, p. 36-43, 2005.

GHOSH, S.; KUISIENE, N.; CHEEPHAM, N. The cave microbiome as a source for drug discovery: Reality or pipe dream?. *Biochemical pharmacology*, v. 134, p. 18-34, 2017.

GILBERT, J., DANIELPOL, D. L. & STANFORD, J. A. *Groundwater Ecology*. Academic Press Limited, San Diego, California. 571 pp, 1994.

GOMES, F.T.M.C.; FERREIRA, R.L. & JACOBI, C.M. Comunidade de artrópodes de uma caverna calcária em área de mineração: composição e estrutura. *Rev. bras. de Zoociências*, V.2, n.1, p.77-96, 2000.

HARSHEY, R. M. Bacterial motility on a surface: many ways to a common goal. *Annual Reviews in Microbiology*, v. 57, n. 1, p. 249-273, 2003.

HILL, G. T. *et al.* Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, v. 15, n. 1, p. 25–36, 2000.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTA. *Plano de manejo do Parque Estadual do Ibitipoca*. Belo Horizonte, 2007.

JURADO, V. *et al.* *Agromyces subbeticus* sp. nov., isolated from a cave in southern Spain. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, v. 55, n. 5, p. 1897-1901, 2005.

KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; AHMAD, M.; OVES, M. & WANI, P. A. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. *Archives of Agronomy and Soil Science* 56, 73–98, 2010.

KOCH, A. L. The biophysics of the gram-negative periplasmic space. *Critical reviews in microbiology*, v. 24, n. 1, p. 23-59, 1998.

KOCK, A. L.; WOESTE, S. Elasticity of the sacculus of *Escherichia coli*. *Journal of bacteriology*, v. 174, n. 14, p. 4811-4819, 1992.

LEMES, C. G. C. *Diversidade metagenômica e potencial biotecnológico de cavernas de canga do Quadrilátero Ferrífero*. 85 (Mestrado em Biotecnologia). Núcleo de Pesquisas em Ciências Biológicas Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2018.

LEMES, C.G.C. *et al.* 16S rRNA Gene Amplicon Sequencing Data of the Iron Quadrangle Ferruginous Caves (Brazil) Shows the Importance of Conserving This Singular and Threatened Geosystem. *Diversity*, v. 13, n. 10, p. 494, 2021.

LIMA, P.E.S. *et al.* Caracterização geoespeleológica preliminar da Gruta Martimiano II, Santa Rita de Ibitipoca – MG. 34 *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 2017.

LOWY, F. D. *Staphylococcus aureus* infections. *New England journal of medicine*, v. 339, n. 8, p. 520-532, 1998.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Técnica de Coloração de Gram. Brasília: *Ministério da Saúde, Programa Nacional de Doenças Sexualmente Transmissíveis e AIDS*, 1997.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do Solo* 2a. Lavras. ISBN 85-87692-33-x. 2006.

NAUTIYAL, C. S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiol Lett*, v. 170, n. 1, p. 265-70, Jan 01 1999.

NOUROZIAN, J. *et al.* Biological control of *Fusarium graminearum* on wheat by antagonistic bacteria. *Songklanakarín J. Sci. Technol*, v. 28, n. Suppl 1, p. 29-38, 2006.

NUMMER, A. R. *et al.* Potencial geoturístico do Parque Estadual da Serra do Ibitipoca, Sudeste do Estado de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 35, n. 1, p. 112–122, 2012.

NUMMER, A.R. *Análise Estrutural e estratigráfica do grupo Andrelândia na região de Santa Rita do Ibitipoca-Lima Duarte, sul de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

- ORAKCI, G.E. *et al.* Selection of antagonistic actinomycete isolates as biocontrol agents against root-rot fungi. *Fresenius Environ. Bull*, v. 19, p. 417-424, 2010.
- PAJARES, S. & BOHANNAN, B. J. M. Ecology of Nitrogen Fixing, Nitrifying, and Denitrifying Microorganisms in Tropical Forest Soils. *Front Microbiol* 7, 1045, 2016.
- PEREIRA, E. L.; MARTINS, B. A. Processos biotecnológicos na produção de bioinseticidas. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde*, Três Corações, v. 14, n. 2, p. 714-734, ago/dez. 2016.
- PEREZ, R.C. & GROSSI, W.R. The quartzitic speleological district of the Parque Florestal Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brazil, *International Congress of Speleology*, 1987.
- PINTO, C.P.; GROSSI-SAD, J.H. Sinopse da Geologia Regional. In: Programa Levantamentos Geológicos do Brasil. Texto Explicativo da Folha SF.23.X-C-VI Lima Duarte (Pinto, C.P. org.) DNPM/CPRM, 1991.
- PRAKASH, D. *et al.* Actinomycetes: a repertory of green catalyts with a potential revenue resource. *BioMed research international*, v. 2013, 2013.
- RAHAMATHULLA, M. P.; B.N. HARISH, L.; MATASEJE,; MULVEY M.R. . Carbapenem resistance mechanisms among blood isolates of *Klebsiella pneumoniae* and *Escherichia coli*. *Journal. Microbiol.* 10:45-53, 2016.
- SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springerplus* 2, 587, 2013.
- SPERANDIO, V. *et al.* Bacteria–host communication: the language of hormones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 100, n. 15, p. 8951-8956, 2003.
- STALEY, J. T.; REYSENBACH, A.-L. Biodiversity of Microbial Life: Foundation of Earth's Biosphere. *New York: Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology*, 2001.
- STREIT, W. R.; SCHMITZ, R. A. Metagenomics - The key to the uncultured microbes. *Current Opinion in Microbiology*, v. 7, n. 5, p. 492–498, 2004.
- TRAJANO, E. & MOREIRA, J.R.A. Estudo da fauna de cavernas da província espeleológica arenítica Altamira-Itaituba, Pará. *Rev. Bras. Biol.*, V.51, n.1, p.13-29, 1991.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. Antimicrobial resistance: global report on surveillance. *World Health Organization*, 2014.

AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS NO MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO 3D A PARTIR DE MODELOS FOTOGRAFÉTRICOS DE CAVIDADES SUBTERRÂNEAS EM MINAS GERAIS, BRASIL.

PROCESSES AUTOMATION IN 3D SPELEOLOGICAL MAPPING FROM PHOTOGRAMMETRIC MODELS OF UNDERGROUND CAVITIES IN MINAS GERAIS, BRAZIL.

Autor

Paulo Rodrigo Simões

Universidade Federal do Paraná - UFPR

e-mail: paulo.simoies@ufpr.br

Coautores

Luís Augusto Koenig Veiga; Marcio Augusto Reolon Schmidt

RESUMO

Mapas espeleológicos vêm sendo produzidos por processos manuais desde meados do século XIX, no Brasil, a partir de levantamentos topográficos e croquis. Nas últimas décadas, inovações tecnológicas como os medidores eletrônicos de distância e a comunicação com aplicativos de topografia de cavernas têm permitido a elaboração de mapas totalmente em meio digital, ainda com o emprego de procedimentos manuais.

Atualmente, além dos escaneamentos a laser, levantamentos fotogramétricos de curta distância vêm sendo empregados para a geração de modelos 3D de cavidades e têm auxiliado na construção de mapas espeleológicos a partir de procedimentos automatizados que permitem a extração de informação métrica com precisão, contribuindo na redução de erros e tempo. Este processo permite a obtenção dos limites de uma cavidade em vistas clássicas como planta baixa, perfis longitudinais e cortes transversais e outros menos usuais, como os contornos verticais longi-

ABSTRACT

Speleological maps have been produced in Brazil since the mid-nineteenth century by manual processes by topographic surveys and sketches. In recent decades, technological innovations such as electronic distance meters and integration with cave surveying softwares have allowed the preparation of digital maps, still using manual procedures.

Besides laser scans, short-distance photogrammetric surveys have been used to generate 3D models of cavities. They assisting the construction of speleological maps from automated procedures that allow the extraction of metric information accurately, contributing to the reduction of errors and time. This process allows us to obtain the limits of a cavity in classic views such as floor plan, longitudinal profiles and cross-sections and other less common ones, such as longitudinal and transversal vertical projections. In addition, it permits extracting contour lines and other

tudinal e transversal, além da extração das curvas de nível e outras feições de interesse a serem vetorizadas a partir de mosaicos de ortofotos do piso, paredes e do teto da cavidade.

Modelos fotogramétricos 3D de cavidades subterrâneas permitem o cálculo de variáveis espeleométricas, incluindo o volume, de difícil obtenção pelo método topográfico convencional e podem ser integrados a modelos de superfície topográfica com imagens de alta resolução, contribuindo na visualização e análise da paisagem e das características do seu local de inserção.

Os levantamentos realizados na Gruta dos Sete Salões e na Mina do Veloso demonstraram que os modelos gerados apresentam uma geometria muito próxima do real, podendo ser realizados em cavidades naturais ou mesmo artificiais, como minas de ouro históricas. Seguindo-se o fluxo de trabalho proposto, visando a geração de mapas espeleológicos 3D, colocam-se como alternativa aos levantamentos topográficos tradicionais, sendo passível de aplicação, inclusive, em modelagens tridimensionais geradas a partir de nuvens de pontos por escaneamentos a laser.

PALAVRAS-CHAVE: espeleologia, fotogrametria, modelagem 3D, espeleotopografia, mapeamento espeleológico, automação.

INTRODUÇÃO

Os primeiros mapeamentos de cavernas brasileiras feitos de forma sistemática, foram realizados pelo norueguês Peter Andreas Brandt, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais, a partir de 1835 (Lott, 2014). Brandt foi contratado pelo paleontólogo dinamarquês Peter Lund, para registrar as cavernas por ele pesquisadas, sendo conhecidos ao menos 27 desses mapas. Não há descrições dos métodos de levantamento empregados, mas é de se supor o uso de bússola e algum instrumento de medição de distâncias (Auler et al., 2001).

Desde então, o mapeamento de cavernas tem consistido, essencialmente, na representação de seus limites e feições por meio de croquis, utilizando-se de levantamentos topográficos realizados, geralmente, a partir de instrumentos como

features of interest that are vectorized from mosaics of orthophotos of the floor, walls and ceiling of the cavity.

3D photogrammetric models of caves allow the calculation of speleometric variables, including volume, that are difficult to obtain by the conventional topographic method. These can be integrated with topographic surface models with high-resolution images, contributing to the visualization and analysis of the landscape and its site characteristics.

The surveys carried out in the Sete Salões Cave and Veloso Gold Mine demonstrated that the generated models present geometry very close to the real one, and can be performed in natural or even artificial cavities, such as historical gold mines. Following the proposed workflow aimed at generating 3D speleological maps, they are an alternative to traditional topographic surveys, and can even be applied to three-dimensional modeling generated from point clouds by laser scans.

KEYWORDS: speleology, photogrammetry, 3D modeling, speleothopography, speleological mapping, automation.

INTRODUCTION

The first systematic mappings of Brazilian caves was carried out by the Norwegian Peter Andreas Brandt in the region of Lagoa Santa, Minas Gerais, on 1835 (Lott, 2014). Brandt was hired by Danish paleontologist Peter Lund to record the caves he surveyed, and at least 27 of these maps are known. No descriptions of the employed survey methods exists, but one can assume the use of a compass and some instrument for measuring distances (Auler et al., 2001).

Since then, the mapping of caves has consisted essentially in the representation of their limits and features through sketches, using topographic surveys, usually with instruments such as compass and tape measure in a totally manual process. This method was historically consolidated due to its suitability to the

bússola e trena em processo totalmente manual. Este método foi historicamente consolidado dada a sua adequação às características morfológicas e dificuldades na permanência e no deslocamento no meio subterrâneo, do seu custo relativamente reduzido (Westoby *et al.*, 2012) e baixa complexidade na realização de leituras e elaboração de croquis.

No fim dos anos 80 do século XX foram definidas e adotadas normas e convenções espeleométricas (S.B.E., 1991), determinando as formas de mensuração das cavernas brasileiras e a classificação da precisão e nível de detalhamento de um mapa (Sánchez, 1980). É neste mesmo período que se começa a produção de mapas espeleológicos com o auxílio de computadores via programação (Lima, 1987), CAD (Cavalcanti, 1996) ou software para o ajustamento de dados topográficos e visualização 3D (Corvi, 2017), iniciando a transição do processo analógico ao digital.

O método de mapeamento convencional apresenta resultados com limitações inerentes, como o baixo nível de detalhamento das variações morfológicas, imprecisões dos instrumentos ou de natureza operacional, tempo relativamente longo para execução dos trabalhos de campo e de escritório, necessidade de transcrição de dados topográficos e desenho manual. O baixo detalhamento geométrico reflete na impossibilidade de se calcular, com precisão, variáveis espeleométricas como o volume (Calux, 2018), quesito importante na definição do grau de relevância de cavidades, em atendimento à legislação ambiental brasileira (ICMBio/CECAV, 2013).

Nos últimos anos, tornou-se possível a geração de mapas espeleológicos totalmente em ambiente digital, em função da evolução técnica de instrumentos e disponibilidade de softwares (Trimmis, 2018). Trata-se da combinação de um dispositivo de mensuração (DistoX) de distâncias e sensores de rotação que permitem a obtenção de ângulos verticais e horizontais com precisões de 3mm e 0.5° e aplicativos de topografia que rodam em celulares e permitem a realização de desenhos diretamente na tela do aparelho (Heeb 2008). Apesar da automação da coleta e tratamento dos dados topográficos, da visualização em 3D do modelo topográfico, a elaboração dos croquis continua sendo feita de forma manual.

morphological characteristics and difficulties in staying and moving in the underground environment, the relatively low cost (Westoby et al., 2012) and low complexity.

At the end of the 1980s, speleometric norms and conventions were defined and adopted (S.B.E., 1991), determining the forms of measurement of the Brazilian caves and the classification of the precision and level of detail of a map (Sánchez, 1980). It is in this same period that the production of speleological maps with the aid of computers via programming (Lima, 1987), CAD (Cavalcanti, 1996) or software for the adjustment of topographic data and 3D visualization (Corvi, 2017) begins, initiating the transition from analog to digital process.

The conventional mapping method presents results with inherent limitations, such as the low level of detailing of morphological variations, inaccuracies of the instruments or of operational nature. In addition, the relatively long time for execution, the need for transcription of topographic data and manual drawing. The low geometric detailing reflects in the impossibility of precisely calculating, speleometric variables such as volume (Calux, 2018). Which is an important item on Brazilian environmental legislation to define the degree of relevance of the caves (ICMBio/CECAV, 2013).

In recent years, it has become possible to generate speleological maps entirely in a digital environment due to the technical evolution of instruments and availability of software (Trimmis, 2018). The distances and rotation sensors measuring device (DistoX) allow obtaining vertical and horizontal angles with accuracies of 0.5° and 3mm for distances. This is then combined with topography applications that run on mobiles and allow the realization of drawings directly on the screen of the device (Heeb, 2008). Despite the automation of topographic data collection and treatment, and the 3D visualization of the topographic model, the sketches preparation is still done manually.

Atualmente, levantamentos tridimensionais de cavidades em alta resolução vêm sendo executados com sucesso, com destaque para os escaneamentos a laser (Araújo, 2016) (Idrees *et al.*, 2016) (Tsakiri *et al.*, 2007), fotogramétricos (Alessandri *et al.* 2020) ou por métodos geofísicos (elétricos, eletromagnéticos, sísmicos, gravimétricos, magnéticos) (Hoover, 2003). A escolha de um método de levantamento e modelagem 3D dependerá da natureza ou finalidade da pesquisa, dos produtos cartográficos a serem gerados, dos recursos humanos e financeiros disponíveis, das características litoestratigráficas e localização da cavidade, entre outros fatores.

Levantamentos geofísicos visam prover informações relativas à subsuperfície, usualmente na avaliação da disponibilidade ou vulnerabilidade de aquíferos, riscos geotécnicos (Chalikakis *et al.*, 2011), no mapeamento litoestrutural (Gama *et al.* 2019) ou na delimitação de cavidades (Mlenek *et al.*, 2017). Métodos geofísicos são utilizados desde a década de 60, tendo ganhado maior expressividade nos últimos anos devido aos desenvolvimentos tecnológicos, redução dos custos, simplificação dos procedimentos de campo e melhor interpretação dos dados.

O escaneamento a laser é o método de levantamento 3D com o maior rigor na geometria e de captura rápida, tendo possibilitado um salto qualitativo no registro tridimensional, ao gerar nuvens de pontos de alta densidade, resultando em novas formas de representação e análise (Tsakiri *et al.*, 2007). No Brasil, seu uso em cavidades remonta a 2001, com o perfilamento da entrada da Lapa Nova de Vazante, realizado por uma mineradora, o que abriu discussões sobre a revisão da graduação de topografias adotada pela UIS durante o 21º Congresso Brasileiro de Espeleologia (Bittencourt 2019, com. pess.), nunca proposta. Atualmente, este método vem sendo utilizado no registro de cavidades em processos de licenciamento ambiental ou de uso turístico (Grohmann *et al.*, 2019). Sua aplicação é limitada pelo relativo alto custo operacional e condições adversas do ambiente subterrâneo (Araújo, 2016).

*Currently, high resolution three-dimensional cave surveys have been successfully performed, highlighting the use of laser scanners (Araújo, 2016; Idrees *et al.*, 2016; Tsakiri *et al.*, 2007), photogrammetric (Alessandri *et al.*, 2020) or by geophysical methods (electrical, electromagnetic, seismic, gravimetric, magnetic) (Hoover, 2003). The choice of a survey and 3D modeling method will depend on the nature or purpose of the research, the cartographic products to be generated, the human and financial resources available, the lithostratigraphic characteristics and location of the cave, among other factors.*

*Geophysical surveys aim to provide information related to the subsurface, usually in the evaluation of the availability or vulnerability of aquifers, geotechnical risks (Chalikakis *et al.*, 2011), in lithostructural mapping (Gama *et al.*, 2019) or in the delimitation of caves (Mlenek *et al.*, 2017). Geophysical methods have been used since the 1960s, but gained more amplitude in recent years, given technological developments, cost reduction, simplification of field procedures and better data interpretation.*

*Laser scanning is the 3D survey method with the fastest capture and highest accuracy in geometry. It enabled a qualitative leap in three-dimensional registration by generating high-density point clouds, resulting in new forms of representation and analysis (Tsakiri *et al.*, 2007). Its use in caves dates back to 2001 in Brazil, with the Lapa Nova de Vazante entrance profiling carried out by a mining company, which opened discussions on the never proposed revision of the topographies grading adopted by UIS during the 21st Brazilian Congress of Speleology (Bittencourt, 2019, pers. comm.). Currently this method has been used in the registration of cavities in environmental licensing and tourism use processes (Grohmann *et al.*, 2019). Its application is limited by the relative high operational cost and adverse conditions of the underground environment (Araújo, 2016).*

No Brasil, modelos fotogramétricos 3D de cavidades vêm sendo realizados desde 2016, quando foram modeladas a entrada da Gruta dos Palhares¹, a entrada da Gruta do Brega² e a Lapa do Boquête³. No entanto, estes levantamentos contemplaram apenas a etapa de modelagem 3D de áreas restritas à entrada das cavidades, não sendo produzidos mapas a partir desses modelos.

A Fotogrametria se baseia na extração de medidas a partir de fotografias, sendo amplamente empregada no mapeamento da superfície terrestre, por utilizar métodos que permitem a obtenção de informações topográficas de maneira rápida e eficiente (Lima et al, 2010). Com ampla utilização na Arquitetura, Medicina, Indústria e Engenharia, a Fotogrametria a curta distância pressupõe a proximidade entre a câmara e o objeto a ser fotografado (Tommaselli, 2009). O emprego de câmeras digitais de médio formato em levantamentos fotogramétricos “permite grande flexibilidade e alta qualidade geométrica, desde que utilizados processos fotogramétricos rigorosos” (Ruy, 2008).

O levantamento fotogramétrico realizado na Gruta dos Fugitivos resultou em um modelo 3D em escala, orientado em relação ao norte magnético e posicionado segundo coordenadas UTM. A partir deste modelo, foi possível gerar um mapa espeleológico 3D através de processos automatizados de extração vetorial dos contornos, segundo planos de representação em planta, perfis longitudinais e cortes transversais. Novos produtos foram agregados, como mosaicos de ortofotos de teto, piso e paredes, modelos digitais de elevação e curvas de nível. Pôde-se, também, calcular o volume da cavidade. Este resultado inicial se mostrou promissor,

In Brazil, 3D photogrammetric cave models have been carried out since 2016, when the entrance of Gruta dos Palhares¹, the entrance of Gruta do Brega² and Lapa do Boquête³ were modeled. However, these surveys contemplated only the 3D modeling stage of areas restricted to the entrance of the cavities, and no maps were produced from these models.

Photogrammetry is based on the extraction of measurements from photographs, being widely employed in mapping the earth's surface by using methods that allow obtaining topographic information quickly and efficiently (Lima et al, 2010). With wide use in Architecture, Medicine, Industry and Engineering, Short-Distance Photogrammetry presupposes the proximity between the camera and the object to be photographed (Tommaselli, 2009). The use of medium format digital cameras in photogrammetric surveys “allows great flexibility and high geometric quality, provided rigorous photogrammetric processes are used” (Ruy, 2008).

The photogrammetric survey conducted in the Fugitivos Cave resulted in a scaled 3D model, oriented in relation to magnetic north and positioned according to UTM coordinates. From this model, it was possible to generate a 3D speleological map through automated processes of features extraction of the contours according to representation plans, longitudinal profiles and cross sections. New products were added, such as orthophotos mosaics of ceiling, floor and walls, digital elevation models and contour lines. It was also possible to calculate the volume of the cavity. This initial result was promising, and was replicated in the Sete

1 Gruta em arenito localizada em Sacramento, MG. Modelo 3D disponível em: <https://skfb.ly/6LNrx>.

2 Gruta em calcário localizada em Pains, MG. Modelo 3D disponível em: <https://skfb.ly/6LNtP>.

3 Sítio arqueológico em cavidade natural localizado no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Januária Itacarambi, MG. Disponível em: <https://skfb.ly/6LNtU>.

1 Sandstone cave located in Sacramento, Minas Gerais. 3D model available at: <https://skfb.ly/6LNrx>.

2 Limestone cave located in Pains, Minas Gerais. 3D model available at: <https://skfb.ly/6LNtP>.

3 Archeological site in a natural cavity located in the Cavernas do Peruaçu National Park, Januária/Itacarambi, MG. Available at: <https://skfb.ly/6LNtU>.

tendo sido replicados na Gruta dos Sete Salões⁴, Gruta do Fogão⁵, Mina do Bijoca⁶ e Mina do Veloso⁷.

Este trabalho se propõe a apresentar os resultados na geração de modelos fotogramétricos e na produção de mapas espeleológicos 3D a partir destes por processos automatizados, no cálculo de variáveis espeleométricas e em análises morfológicas realizados na Gruta dos Sete Salões e na Mina do Veloso. Pretende, também, discorrer sobre vantagens e limitações da sua utilização enquanto método alternativo ao mapeamento convencional ou por levantamentos a laser.

Estima-se que este método permitirá, por meio da automatização de tarefas, a redução de tempo, custos e erros em levantamentos de campo. Soma-se o relativo baixo investimento necessário para sua implementação, a exatidão dos produtos gerados em atendimento à legislação, facilidades no compartilhamento e divulgação dos resultados, aspectos potenciais na difusão junto à comunidade espeleológica. Sua reprodutibilidade dependerá do aprimoramento técnico dos interessados, para os quais este trabalho pretende ser fonte de referência e inspiração.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os mapas espeleológicos foram gerados por extração vetorial automática a partir de planos pré-determinados somados à vetorizações de elementos de interesse sobre modelos fotogramétricos 3D, modelos digitais de superfície e mosaicos de ortofotos, referenciados no sistema UTM, datum SIRGAS 2000, fuso 23S.

4 Caverna em quartzito localizada no Parque Estadual dos Sete Salões, Minas Gerais. Modelo 3D <https://skfb.ly/ooPM9> e mapa 3D <https://skfb.ly/ooQXn>.

5 Caverna em quartzito localizada em Ouro Preto, Minas Gerais. Modelo 3D <https://skfb.ly/6TCHK> e mapa 3D <https://skfb.ly/6TCHN>.

6 Mina de ouro histórica localizada em Ouro Preto, Minas Gerais. Modelo 3D <https://skfb.ly/6TEzF> e mapa 3D <https://skfb.ly/6TEzL>.

7 Mina de ouro histórica localizada em Ouro Preto, Minas Gerais. Modelo 3D <https://skfb.ly/6TI7D> e mapa 3D <https://skfb.ly/6TLR8>.

Salões Cave⁴, Fogão Cave⁵, Bijoca Mine⁶ and Veloso Gold Mine⁷.

This paper aims to present the results in the generation of photogrammetric models and in the production of 3D speleological maps by automated processes. In addition, presents the calculation of speleometric variables and morphological analyses performed in the Sete Salões Cave and Veloso Gold Mine. It also intends to discuss the advantages and limitations of its use as an alternative method to conventional mapping or laser surveys.

It is estimated that this method will allow the reduction of time, costs and errors in field surveys through the automation of tasks. The relative low investment necessary for its implementation, the accuracy of the products generated in compliance with the legislation and the efficiency for sharing and disseminating the results, are all potential aspects in the dissemination among the speleological community. Its reproducibility will depend on the technical improvement of the interested party, for whom this work intends to be a source of reference and inspiration.

MATERIALS AND METHODS

The speleological maps were generated by automatic features extraction from predetermined planes plus vectorization of elements of interest on 3D photogrammetric models, digital surface models and orthophoto mosaics, all referenced to the UTM system, SIRGAS 2000 datum, zone 23S.

4 Quartzite cave located in the Sete Salões State Park, Minas Gerais. 3D model <https://skfb.ly/ooPM9> and 3D Map <https://skfb.ly/ooQXn>.

5 Quartzite cave located in Ouro Preto, Minas Gerais. 3D model <https://skfb.ly/6TCHK> and 3D Map <https://skfb.ly/6TCHN>.

6 Historic gold mine located in Ouro Preto, Minas Gerais. 3D model <https://skfb.ly/6TEzF> and 3D Map <https://skfb.ly/6TEzL>.

7 Historic gold mine located in Ouro Preto, Minas Gerais. 3D model <https://skfb.ly/6TI7D> and 3D Map <https://skfb.ly/6TLR8>.

Os mapeamentos da Gruta dos Sete Salões e da Mina do Veloso foram executados em fases de planejamento, coleta de dados, pós-processamento, análises, geração de produtos cartográficos e divulgação de produtos, segundo fluxo de trabalho proposto por Simões (2019). Os levantamentos de campo foram realizados nos municípios de Ouro Preto e Santa Rita do Itueto, ambos no Estado de Minas Gerais. Ouro Preto se localiza em uma das principais províncias metalogenéticas do mundo, o Quadrilátero Ferrífero, região que atraiu grandes contingentes populacionais em fins do século XVII em função da extração de ouro por mão de obra escravizada. Atualmente, é a região com a maior produção de minério de ferro do país e um dos principais destinos turísticos. O Parque Estadual Sete Salões localiza-se no leste do estado e abriga um dos últimos remanescentes de mata atlântica do médio Rio Doce (Figura 1).

The mappings of the Sete Salões Cave and Veloso Gold Mine were executed in phases according to the workflow proposed by Simões (2019). The phases were, planning, data collection, post-processing, analysis, generation of cartographic products and dissemination of products. The field surveys were carried out in the municipalities of Ouro Preto and Santa Rita do Itueto, both in the State of Minas Gerais. Ouro Preto is located in one of the main metallogenetic provinces of the world, the Iron Quadrangle, a region that attracted large population contingents in the late seventeenth century due to the extraction of gold with slave labor. Today it is the region with the largest production of iron ore in the country and one of the main tourist destinations. Sete Salões State Park is located in the east of the state and is home to one of the last remnants of the Atlantic Forest of the middle Doce River (Figure 1).

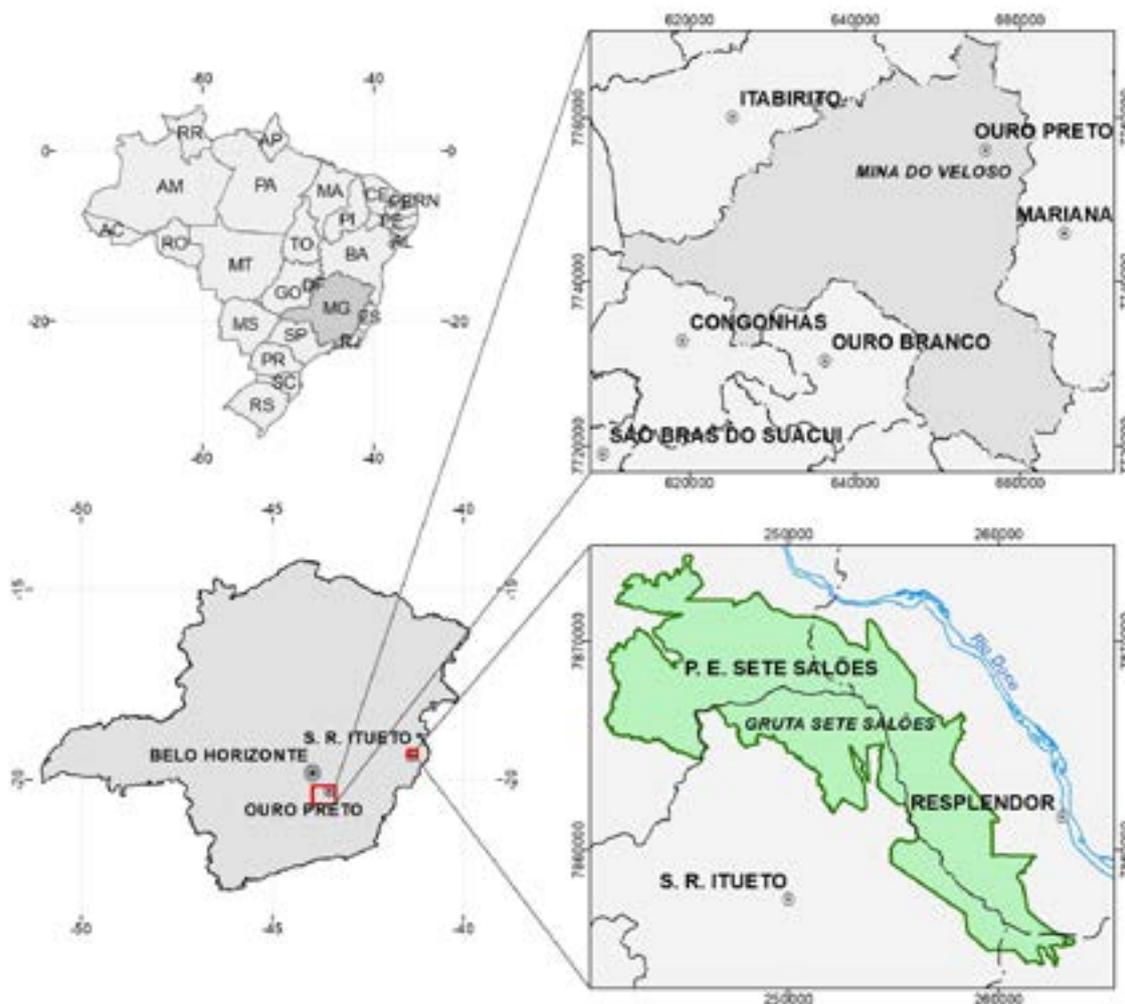


Figura 1 – Mapa de localização das cavidades levantadas.

Figure 1 – Location map of the cavities surveyed.

Os pós-processamentos, extrações e edições vetoriais e análises dos dados foram realizados no Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia – GEENG, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Para tanto, foram utilizados microcomputadores com processadores Intel I9, 64 MB RAM, placa de vídeo Nvidia GTX 1660, SSD de 240 GB, HD de 2 TB e os softwares AutoCAD Map 2018, 3D Reshaper 2018, ArcGIS 10.5, RECAP Photo 2020, Agisoft Metashape 1.6 e Compass.

As Cavidades Subterrâneas Estudadas

A Gruta dos Sete Salões é uma caverna em quartzito da Formação João Pinto que se desenvolve sobre eixo de dobra de direção NW-SE e apresenta padrão de desenvolvimento linear, com perfil horizontal e cortes circulares, sendo desprovida de espeleotemas e águas circulantes. Localiza-se no Parque Estadual dos Sete Salões, uma unidade de conservação de proteção integral e seu levantamento foi autorizado pelo ICMBio (80071-1). O turismo desordenado que se verificava por décadas antes, da criação da UC gerou impactos significativos como os grafitismos, queima de madeira, pisoteio, lixo, entre outros (Figura 1).

A Mina do Veloso é uma mina subterrânea do século XVIII (Ferreira, 2017) composta de uma galeria principal e galerias secundárias abertas para a extração de ouro por trabalhadores africanos escravizados. Se desenvolve em itabiritos e xistos, com condutos principais com direção N-S, perpendiculares ao plano de acamamento da rocha (Gomes, 2016). Localiza-se em área urbana do município de Ouro Preto, sendo importante estrutura minerária convertida em atrativo turístico guiado (Figura 1).

Planejamentos

Esta etapa inicial consistiu em levantamentos bibliográficos e cartográficos, objetivando a fundamentação teórica do estudo, a caracterização das cavidades e área de entorno, a geração de mapas de localização e de modelos digitais de superfície para integração com os modelos fotogramétricos. Foram localizados os mapas espeleológicos da Gruta dos Sete Salões, feito

The post-processing, features extraction, vector editing and data analysis were performed in the Laboratory of Geodesy Applied to Engineering (GEENG) of the Graduate Program in Geodetic Sciences at the Federal University of Paraná (UFPR). Microcomputers with Intel I9 processors, 64 MB RAM, Nvidia GTX 1660 video card, 240 GB SSD, 2 TB HD and AutoCAD Map 2018, 3D Reshaper 2018, ArcGIS 10.5, InfraWorks 2019, RECAP Photo 2020, Agisoft Metashape 1.6 and Compass 5.18 software were used.

Underground Cavities Studied

Sete Salões Cave is a quartzite cave of the João Pinto Formation that develops on the NW-SE fold axis and presents a linear development pattern, with a horizontal profile and circular cross-sections, being devoid of speleothems and circulating waters. It is located in the Sete Salões State Park, a fully protected conservation unit and its survey was authorized by ICMBio (80071-1). The disorderly tourism that existed for decades before the creation of the park generated significant impacts such as graffiti, wood burning, trampling, garbage, among others (Figure 1).

Veloso Gold Mine is an 18th century underground mine opened for gold extraction by slaves (Ferreira, 2017). It is composed of a main gallery and secondary galleries. It develops in itabirites and shales, with main conduits with N-S direction, perpendicular to the bedding plane of the rock (Gomes, 2016). It is located in the urban area of the municipality of Ouro Preto, being an important mining structure converted into a guided tourist attraction (Figure 1).

Planning

This initial stage consisted of bibliographic and cartographic surveys, aiming at the theoretical foundation of the study, the characterization of the cavities and surrounding area, the generation of location maps and digital surface models for integration with the photogrammetric models. The speleological maps of the Sete Salões Cave, made by the Grupo Bambuí de

pele Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas (Baeta, 2000) e da Mina do Veloso, feito pela Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE. Visando a elaboração de modelos de superfície das áreas de entorno das cavidades levantadas foram baixadas imagens Bing Maps⁸ e dados Alos Palsar⁹ para a elaboração de modelos de elevação e geração de sombreamento sintético.

Coletas de dados

Os trabalhos de campo se iniciaram com o posicionamento de pontos nas entradas das cavidades por GNSS de navegação Garmin ETREX 30 e definição dos respectivos pontos zero (Datum local). Seguiu-se com a distribuição de pontos de controle (GCP's) codificados e execução de topografias com uso de bússola Brunton sobre tripé para medições do azimute e trena a laser Lomwum para medições de distâncias e ângulos verticais (Figura 2).

Pesquisas Espeleológicas (Baeta, 2000) and of the Veloso Gold Mine, made by the Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), were located. In order to elaborate surface models of the areas surrounding the cavities surveyed, Bing Maps⁸ images and Alos Palsar⁹ data were downloaded to elaborate elevation models and generate shading.

Data collection

The fieldwork began with the positioning of points at the entrances of the cavities by GNSS positioning using a Garmin ETREX 30 and definition of their respective point zero (local Datum). This was followed by the distribution of coded control points (GCP's) and the execution of topographies using a Brunton compass on a tripod for azimuth measurements and a Lomwum laser distance measuring device for distance and vertical angle measurements (Figure 2).



Figura 2 – Fluxo de trabalho para geração de mapas espeleológicos a partir de modelos fotogramétricos.

Figure 2 – Workflow for generating speleological maps from photogrammetric models.

8 As imagens Bing Maps com 0.6 m de resolução espacial foram baixadas através dos software Terra Incognita, disponível em: <https://sourceforge.net/projects/terraincognita2/>.

8 The Bing Maps images with 0.6 m spatial resolution were downloaded through the Terra Incognita software, available at: <https://sourceforge.net/projects/terraincognita2/>.

9 Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

9 Available at: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

Os levantamentos fotogramétricos foram realizados com câmera Nikon COOLPIX P900 de 14 Mpx, com fotos de dimensões 4608 x 3456 px, distância focal de 4 mm, tendo sido auxiliados por painéis de iluminação a LED. As fotos registraram paredes, pisos e tetos em várias direções e ângulos, em alturas e posições diferentes a fim de evitar oclusões. Foi utilizado o modo automático para definição da velocidade do obturador, ISO e abertura do diafragma. O levantamento da Gruta dos Sete Salões foi parcial e o da Mina do Veloso foi completo. A extração de informações por meio da fotogrametria, neste caso, envolve a tomada de várias fotos do local a ser modelado, sempre com o cuidado de haver uma sobreposição mínima de 60% para a geração dos modelos 3D.

Tratamentos dos dados

Os dados topográficos acrescidos das coordenadas das entradas foram inseridos no software COMPASS¹⁰ 5.18 para redução de dados e transformação do sistema de coordenadas dos pontos de controle, de polares para UTM, no sistema de referência SIRGAS 2000. Este procedimento permitiu a obtenção das coordenadas UTM que foram inseridas em cada ponto de controle do modelo fotogramétrico, acessadas por meio de relatório do software Compass. Os valores das declinações magnéticas foram obtidos no site norte americano da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA)¹¹.

Os modelos fotogramétricos foram gerados no software Agisoft Metashape¹² segundo a sequência de procedimentos: alinhamento das fotos; inserção das coordenadas UTM nos pontos de controle das fotos; inserção de máscaras; otimização do alinhamento; geração de nuvens de pontos; geração das malhas e das texturas, exportação dos produtos, emissão e análise de relatório. Os modelos foram exportados em formatos OBJ e DAE após ser feita a simplificação da malha, de forma a facilitar a manipulação em função do tamanho dos arquivos gerados.

Photogrammetric surveys were performed with a Nikon COOLPIX P900 14 Mpx camera aided by LED lighting panels, resulting in 4608 x 3456 px dimension photos with 4 mm focal length. The photos recorded walls, floors, and ceilings in various directions and angles, at different heights and positions in order to avoid occlusions. Automatic mode was used to set shutter speed, ISO, and aperture. Veloso Gold Mine survey was complete, while Sete Salões Cave was only partial. The extraction of spatial information through photogrammetry, in this case, involves taking several photos of the site to be modeled, always having a minimum overlap of 60% for the generation of 3D models.

Data processing

The topographic data plus the coordinates of the inputs were inserted into COMPASS¹⁰ 5.18 software for data reduction and transformation of the coordinate system of the control points from polar to UTM, in the SIRGAS 2000 reference system. This procedure allowed obtaining the UTM coordinates that were inserted in each control point of the photogrammetric model, accessed through the Compass software report. The magnetic declination values were obtained from the website of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)¹¹.

The photogrammetric models were generated in Agisoft Metashape¹² software according to the following sequence of procedures: alignment of photos; insertion of UTM coordinates in the control points of the photos; masks insertion; alignment optimization; point clouds generation; grids and textures generation; products exportation of; products issue and; analysis. Due to the size of the files generated the grid was simplified in order to facilitate manipulation, then the models were exported in OBJ and DAE formats.

10 Disponível em: <https://fountainware.com/compass/>.

11 Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true>.

12 Disponível em: <https://www.agisoft.com/>.

10 Available at: <https://fountainware.com/compass/>.

11 Available at: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true>.

12 Available at: <https://www.agisoft.com/>.

Os produtos cartográficos gerados foram modelos 3D e nuvens de pontos, mosaicos de ortofotos do piso, tetos e paredes, modelos de elevação do piso e curvas de nível com equidistância de 10 cm. A partir dos GCP's, foi possível alinhar os modelos ao norte da quadrícula, colocá-los em escala e posicioná-los de acordo com o referencial geodésico e avaliar o erro médio do posicionamento do modelo no espaço segundo o referencial adotado. As nuvens de pontos foram inseridas no mapa espeleológico editado no AutoCAD 2018 por meio da interoperabilidade com o software Autodesk RECAP PRO e arquivo em formato RCS. As malhas dos modelos também foram inseridas no desenho do AutoCAD, após processamento e conversão para o formato de intercâmbio DXF utilizando-se o software 3D Reshaper 2018.

A partir dos modelos fotogramétricos 3D, foram realizadas as extrações vetoriais automáticas dos limites das cavidades em plantas baixas, perfis longitudinais e cortes transversais. As curvas de nível foram extraídas do modelo digital de elevação da Gruta dos Sete Salões com equidistância de 10 cm. Adicionalmente, foram extraídas as projeções verticais longitudinal e transversal, formas de representação pouco usuais. Os perfis longitudinais foram extraídos, retificados, copiados, movidos e rotacionados para compor o layout. Estes procedimentos, realizados com o software 3D Reshaper 2018, permitiram a integração com o AutoCAD 2018, onde foram feitas as edições vetoriais e a geração do layout dos mapas, com versão feita também no ArcGIS 10.5. Outras feições como drenagens e blocos puderam ser vetorizadas no mapa da Gruta dos Sete Salões, tomando o mosaico de ortofotos do piso e o modelo de elevação como referência visual.

No que se refere às variáveis espeleométricas, as projeções horizontais (PH) foram calculadas a partir da somatória dos segmentos de linha vetorizados sobre os modelos de forma a representar todo o desenvolvimento das cavidades em plano horizontal. O desenvolvimento linear (DL) para a Gruta dos Sete Salões foi obtido a partir da somatória dos segmentos de reta vetorizados sobre o modelo de elevação do piso e representa esta dimensão da cavidade considerando os desníveis. Os desníveis

The cartographic products generated were 3D models and point clouds, floor, ceilings and walls orthophoto mosaics, floor elevation models and contour lines with 10 cm equidistance. From the GCP's, it was possible to align the models to the north of the grid, scale and position them according to the geodetic referential and evaluate the average error of the model positioning according to the adopted referential. The point clouds were inserted into the speleological map edited in AutoCAD 2018 through interoperability with Autodesk RECAP PRO software and file in RCS format. The models grids were also inserted into the AutoCAD drawing after processing and conversion to DXF exchange format using 3D Reshaper 2018 software.

From the 3D photogrammetric models, automatic features extractions of the cave limits were performed in floor plans, longitudinal profiles and cross-sections. The contour lines were extracted from the digital elevation model of the Sete Salões Cave with 10 cm equidistance. Additionally, the longitudinal and transversal vertical projections were extracted, which are unusual forms of representation. The longitudinal profiles were extracted, rectified, copied, moved and rotated to compose the layout. These procedures, carried out with the 3D Reshaper 2018 software, allowed the integration with AutoCAD 2018, where the vector edits were made and the generation of the map layout, with a version also done in ArcGIS 10.5. Other features such as drainages and blocks could be vectorized on Sete Salões Cave map, taking the orthophoto mosaic of the floor and the elevation model as a visual reference.

Regarding the speleometric variables, the map length were calculated from the sum of line segments vectorized on the models in order to represent the entire development of the cavities in horizontal plane. The linear development (LD) for the Sete Salões Cave was obtained from the sum of the line segments vectorized over the floor elevation model and represents this dimension of the cave considering the level differences. The negative and positive level differences, counted from point zero (local datum), were obtained directly with measurements on

negativo, e positivo, contados a partir do Ponto Zero (datum local), foram obtidos diretamente com mensuração sobre o contorno vertical transversal. Larguras e alturas dos modelos foram dadas pelos contornos verticais. As áreas médias dos cortes transversais e as áreas das cavidades em planta foram também calculadas pelo AutoCAD 2018. Os cálculos dos volumes foram feitos no Agisoft Metashape.

Análises dos dados

A análise dos dados se iniciou pela avaliação dos erros médios quadráticos dos posicionamentos dos modelos no espaço, uma vez que valores imprecisos geram rotações nos eixos X, Y e Z e podem acarretar alterações nos dados espeleométricos, como no caso do desnível e altura da cavidade. Pontos de controle com valor do erro médio mais alto que os demais foram ser desconsiderados, de forma a diminuí-lo.

Os valores do desenvolvimento horizontal (PH) e das alturas de teto extraídos do modelo da Mina do Veloso foram comparados com os valores extraídos do modelo, tendo sido utilizados para se avaliar a manutenção da escala do modelo.

A avaliação do grau de precisão da topografia e detalhamento dos croquis dos mapas espeleológicos pode ser feita pela comparação dos dados obtidos para com a graduação da **Union Internationale de Spéléologie (UIS)**¹³. No entanto, esta graduação contempla apenas o método de mapeamento convencional e se utiliza dos ângulos horizontal e vertical e medidas de distância para a classificação. A escala do modelo da Mina do Veloso foi avaliada através dos resíduos entre as medidas extraídas automaticamente e as medidas realizadas em campo segundo os critérios da UIS, ou seja, a precisão comprimento, dado em metros, e a razão do erro esperado, dado em porcentagem.

Foram calculadas todas as variáveis espeleométricas usuais (PH, DL, DESN Área) e outras menos usuais como largura, comprimento e

the vertical transversal contour. Model heights were given by the vertical contours. AutoCAD 2018 also calculated the average cross-sectional areas and the areas of the cavities in floor plan. Volume calculations were done in Agisoft Metashape.

Data Analysis

The data analysis began by evaluating the mean square errors of the models space positioning, since inaccurate values generate rotations in the X, Y and Z axes and can cause changes in speleometric data, as in the case of level difference and height of the cavity. In order to reduce errors, control points with a higher mean error value than the others were disregarded.

The map length (ML) and ceiling heights values extracted from the Veloso Gold Mine in the field were compared to the values extracted from the 3D model of the mine and were used to evaluate the maintenance of its scale.

*The evaluation of the degree of accuracy of the topography and detail of the sketches of the speleological maps can be done by the analysis of topographic errors and level of detail and comparison of the data obtained with the graduation of the **Union Internationale de Spéléologie (UIS)**¹³ grading. However, this grading considers only the conventional mapping method and uses distance measurements, horizontal and vertical angles for classification. The scale of the Veloso Gold Mine 3D model was evaluated through the residuals between the measurements automatically extracted from the model and the measurements carried out in the field according to the UIS criteria, that is, the accuracy of the length, given in meters, and the expected error ratio, given in percentage.*

All the usual speleometric variables were calculated (ML, LD, Depth, Area) and other less usual ones such as width, length, height and volume (Chabert et al., 1981). That was done

13 Disponível em: <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ijs>.

13 Available at: <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ijs>.

altura, volume, com a finalidade de representar numericamente as geometrias dos modelos e servir de comparação em análises futuras. Para efeito de verificação, os volumes das cavidades foram calculados no Agisoft Metashape e no 3D Reshaper, tendo apresentado os mesmos valores, com diferença apenas nas casas decimais. As análises visuais permitiram a classificação morfológica das cavernas segundo Palmer (1991) e as inspeções permitiram avaliar os pontos mais críticos nas malhas e texturas dos modelos 3D, como oclusões e "holes". A inclinação do modelo da Mina do Veloso pôde ser avaliada a partir de análise visual e mensuração do ângulo formado entre as retas que representam o teto e piso médios da cavidade.

Integrações de modelos

As junções de modelos de superfície topográfica para com os modelos das cavidades foram feitas no software Infracore 2019, que se utiliza de imagens de alta resolução Bing Maps e modelo digital de elevação para geração de modelos realísticos.

Publicação de resultados

Os modelos e mapas gerados foram divulgados num repositório de modelos 3D¹⁴ estando acessíveis para navegação, incluindo recursos de Realidade Aumentada.

with the purpose of numerically representing the geometries of the models and serving as comparison in future analyses. For verification purposes, the volumes of the cavities were calculated in Agisoft Metashape and 3D Reshaper. They presented the same values, with a difference only in the decimal places. The visual analyses allowed the morphological classification of the caves according to Palmer (1991) and the inspections allowed the evaluation of the most critical points in the grids and textures of the 3D models, such as occlusions and "holes". The inclination of the Veloso Gold Mine model was evaluated from measurement of the angle formed between the lines representing the average ceiling and floor of the cavity and a horizontal plane.

Model Integrations

The topographic surface models combination with the cavity models were done in Infracore 2019 software, which makes use of high-resolution Bing Maps images and digital elevation model for realistic model generation.

Publishing of results

The models and maps generated have been released in a 3D¹⁴ model repository and are accessible for navigation, including Augmented Reality features.

¹⁴ Disponível em www.sketchfab.com.

¹⁴ Disponível em: www.sketchfab.com.

RESULTADOS

A Gruta dos Sete Salões

Os trabalhos de mapeamento da Gruta dos Sete Salões foram iniciados a partir da geração de um modelo fotogramétrico parcial da caverna a partir de 926 fotos alinhadas de um total de 1003 tomadas com câmera fotográfica Nikon P900, de distância focal de 4.3 mm e iluminação por painel de LED. Os processamentos foram feitos no software Agisoft Metashape e o modelo apresentou 1.003.312 pontos de ligação, 906 mapas de profundidade, nuvem com 97.210.736 de pontos e 6.087.038 faces¹⁵. O modelo gerado foi duplicado e editado manualmente de forma a representar somente o piso.

Escala, orientação e posicionamento foram definidos a partir de um plano limitado pelos vértices de um triângulo tomados como pontos de controle, dos quais T0 representa o ponto zero da cavidade, situado na entrada. Os pontos de controle tiveram suas coordenadas determinadas a partir de posicionamento com GNSS de navegação Garmin ETREX 30 e levantamento topográfico com bússola Brunton sobre tripé e trena laser, sendo a redução e compatibilização dos dados, transporte de coordenadas e correção da declinação magnética feitos no software Compass. O erro médio quadrático relativo dos pontos de controle apresentado no relatório de processamento do software Agisoft Metashape foi de 0,034 m. Trata-se de um erro relativo, uma vez que não considera a qualidade posicional de T0. (Tabela 1 e Figura 3).

RESULTS

Sete Salões Cave

The Sete Salões Cave mapping work began with the generation of a partial photogrammetric model of the cave from 926 aligned photos of a total of 1003, taken with a Nikon P900 camera, with focal length of 4.3 mm and illumination by LED panel. The processing was done in Agisoft Metashape software and the model presented 1,003,312 connection points, 906 depth maps, cloud with 97,210,736 points and 6,087,038 faces¹⁵. The generated model was duplicated and manually edited to only represent the floor.

Scale, orientation and positioning were defined from a plane limited by the vertices of a triangle taken as control points, of which T0 represents the point zero of the cavity, located at the entrance. The control points had their coordinates determined from positioning with GNSS navigation Garmin ETREX 30 and topographic survey with Brunton compass on tripod and laser tape measure with data processing, coordinate transport and magnetic declination correction performed in Compass 5.18 software. The relative mean square error of the control points presented in the processing report of the Agisoft Metashape software was 0.034m. This is a relative error since it does not consider the positional quality of T0. (Table 1 and Figure 3).

15 Disponíveis em <https://skfb.ly/ooPM9> e <https://skfb.ly/ooPMw>.

15 Available at: <https://skfb.ly/ooPM9> e <https://skfb.ly/ooPMw>.

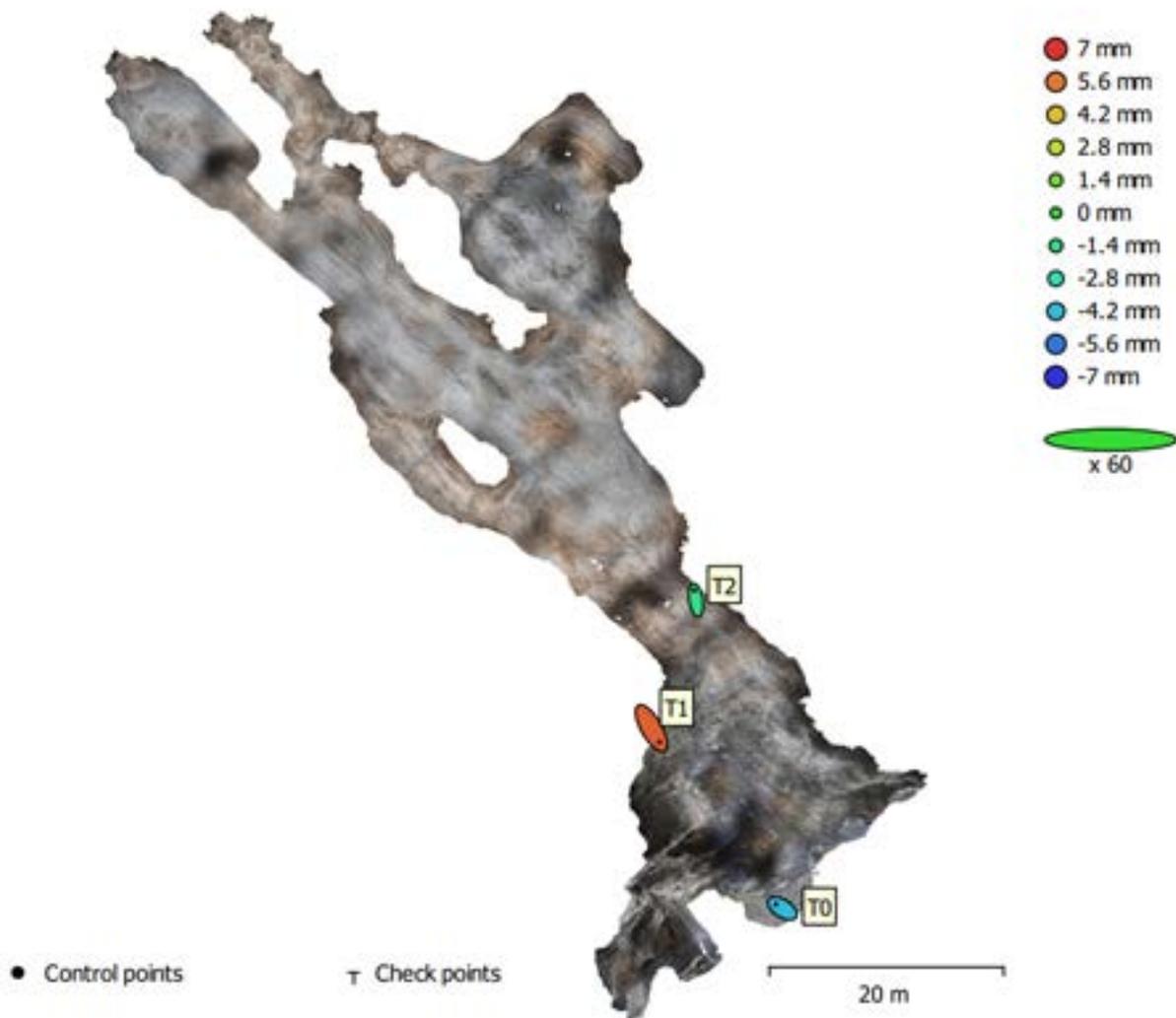


Figura 3 – Erro médio quadrático relativo dos pontos de controle e posicionamento do modelo 3D da Gruta dos Sete Salões emitido pelo relatório de processamento do software Agisoft Metashape.

Os cálculos dos erros associados aos pontos de controle permitiram avaliar o posicionamento do modelo num espaço referenciado. Destacam-se os valores baixos em X e em Y, sendo ainda menor em Z, o que permite supor não ter havido rotação significativa no eixo X, o que implicaria alterações nas medidas de desnível e mesmo da área em planta.

Dada a impossibilidade de retorno ao local, até o momento, não foi possível fazer o levantamento complementar e nem as medições para avaliação da geometria do modelo da Gruta dos Sete Salões no que se refere à escala.

Figure 3 – Relative mean square error of the control points and positioning of the 3D model of the Sete Salões Cave issued by the Agisoft Metashape software processing report.

The error calculations associated with the control points allowed the evaluation of the model positioning in a referenced space. We highlight the low values in X and Y, and even lower in Z, which allowed us to assume that there was no significant rotation in the 3D model, which would imply changes in the level difference measurements and even in the floor plan area.

Given the impossibility of returning to the site until now, it was not possible to do the complementary survey nor the measurements to evaluate the geometry of the Sete Salões Cave model in terms of scale.

Tabela 1 - Valores do erro médio quadrático e das componentes dos pontos de controle para a Gruta dos Sete Salões dados em centímetros. X = leste; Y = norte; Z = altitude, emitido por relatório do software Agisoft Metashape.

RÓTULO	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
T0	-1.85002	1.16637	-0.424583	2.22784	6.636 (19)
T1	2.28676	-4.00698	0.60598	4.65321	9.586 (32)
T2	-0.437768	2.84044	-0.179504	2.87958	14.127 (17)
TOTAL	1.71692	2.91459	0.439584	3.41114	10.268

Table 1 - Mean square error and control point component values for the Sete Salões Cave given in centimeters. X = east; Y = north; Z = altitude, issued by Agisoft Metashape software report.

GCP	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
T0	-1.85002	1.16637	-0.424583	2.22784	6.636 (19)
T1	2.28676	-4.00698	0.60598	4.65321	9.586 (32)
T2	-0.437768	2.84044	-0.179504	2.87958	14.127 (17)
TOTAL	1.71692	2.91459	0.439584	3.41114	10.268

A partir dos modelos 3D foi possível gerar produtos como a nuvem de pontos, mosaicos de ortofotos do piso, teto e paredes, modelo digital de elevação e curvas de nível com equidistância de 10 cm, posteriormente recortados e suavizado no software ArcMap 10.5. Os mosaicos de ortofotos obtiveram GSD de 1,55 mm/px e o modelo digital de elevação, 3,11 mm/px.

Foi possível, também, realizar a extração vetorial automática dos contornos horizontal e vertical (longitudinal e transversal) em 2D e do piso em 3D, dos perfis longitudinais projetados e dos cortes transversais (Figura 4), segundo planos definidos com o software 3D Reshaper 2018. Os vetores foram exportados para o AutoCAD 2018 para edição e composição do layout do mapa espeleológico 3D (Figura 5). Vetorizações adicionais dos blocos e curso d'água foram feitas de forma manual sobre o mosaico de ortofotos do piso e o sombreamento sintético em tons de cinza. Os perfis longitudinais foram retificados também de forma manual.

From the 3D models it was possible to generate products such as the point cloud, floor, ceiling and walls orthophoto mosaics, digital elevation model and contour lines with 10 cm equidistance, later cut and smoothed in ArcMap 10.5 software. The orthophoto mosaics obtained a GSD of 1.55 mm/px and the digital elevation model, 3.11 mm/px.

According to plans defined with the 3D Reshaper 2018 software, it was also possible to perform the automatic features extraction of the horizontal and vertical contours (longitudinal and transverse) in 2D and of the floor in 3D, the projected longitudinal profiles and cross-sections (Figure 4). The vectors were exported to AutoCAD 2018 for editing and composing the layout of the 3D speleological map (Figure 5). Additional vectorizations of the blocks and watercourse were done manually over the mosaic of floor orthophotos and grayscale shading. The longitudinal profiles were also rectified manually.

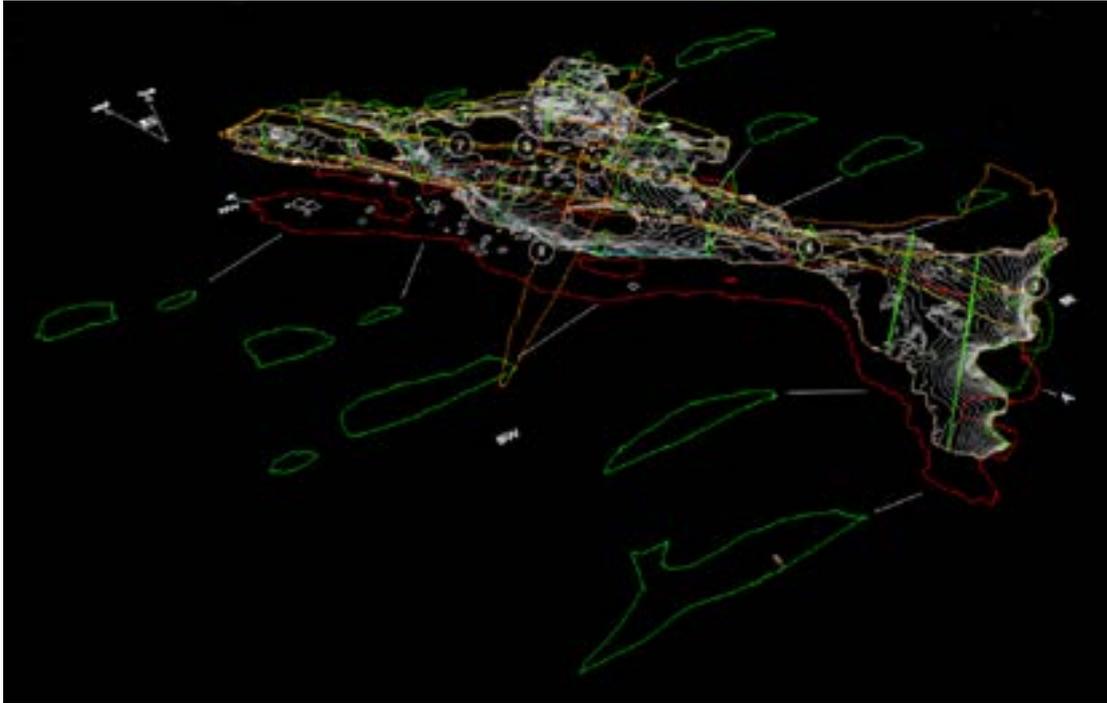


Figura 4 - Processo de composição do mapa espeleológico em ambiente CAD a partir da extração vetorial automática do contorno da cavidade em 2D (vermelho), contorno do piso em 3D (laranja), cortes transversais (verde), perfis longitudinais (amarelo), contornos verticais longitudinal e transversal (marrom), blocos (cinza) e drenagem (azul). Disponível em <https://skfb.ly/ooQXn>.

Figure 4 - Composition process of the speleological map in CAD environment from the automatic vector extraction of the cavity contour in 2D (red), floor contour in 3D (orange), cross sections (green), longitudinal profiles (yellow), vertical longitudinal and transversal contours (brown), blocks (gray) and drainage (blue). Available at: <https://skfb.ly/ooQXn>.

A inspeção visual revelou buracos e oclusões, principalmente no piso, em decorrência da homogeneidade do material, causando uma deficiência de pontos homólogos. Os buracos foram fechados para efeito de cálculo do volume.

Visual inspection revealed holes and occlusions, mainly in the floor, as a result of the homogeneity of the material, causing a deficiency of homologous points identification. The holes were closed for the purpose of volume calculation.

As variáveis espeleométricas foram calculadas para efeito de testagem dos procedimentos, não devendo ser consideradas em razão do modelo ser parcial, correspondendo a cerca de 50% da área total da cavidade. O Desenvolvimento Linear (DL) da Gruta dos Sete Salões é de 188,9 m e foi obtido a partir da somatória dos segmentos que representam o desenvolvimento dos condutos por meio de vetorização sobre o modelo digital de terreno do piso da cavidade. A projeção horizontal (PH) é de 187,93 m e a pouca diferença entre as duas métricas se explica pela relativa horizontalidade da cavidade. A área da cavidade em planta foi calculada em 1.524,47 m², tendo sido subtraídas as áreas dos pilares. Foram calculadas as áreas dos quinze cortes, que variaram de 5 a 100 m², com média de 33,48 m². A partir dos contornos verticais longitudinal e transversal da caverna, foi possível calcular o comprimento em 93,48 m e largura em

The speleometric variables were calculated for the purpose of testing the procedures, and should not be considered due to the model being partial, corresponding to about 50% of the total area of the cave. The Linear Development (LD) of the Sete Salões cave is 188.9 m and was obtained from the sum of the segments that represent the development of the conduits through manual vectorization on the digital terrain model of the cave floor. The map length (ML) is 187.93 m and the little difference between the two metrics is explained by the relative horizontality of the cave. The floor plan area of the cave was calculated to be 1,524.47 m², with the areas of the pillars subtracted. The areas of the fifteen sections were calculated, ranging from 5 to 100 m², with an average of 33.48 m². From the vertical longitudinal and transversal contours of the cave, it was possible to calculate the length at 93.48 m and

55,22 m. A altura total da cavidade é de 9,99 m e foi calculada a partir do contorno vertical transversal, sendo 7,38 m do Ponto Zero (898,95 m) ao ponto mais alto do teto e 2,61 m ao ponto mais baixo no piso, correspondendo ao desnível total. O volume foi calculado em 4.329,3 m³.

width at 55.22 m. The total height of the cave is 9.99 m and was calculated from the vertical transversal projection, being 7.38 m from Point Zero (898.95 m) to the highest point on the ceiling and 2.61 m to the lowest point on the floor, corresponding to the maximum unevenness. The volume calculated is 4,329.3 m³.

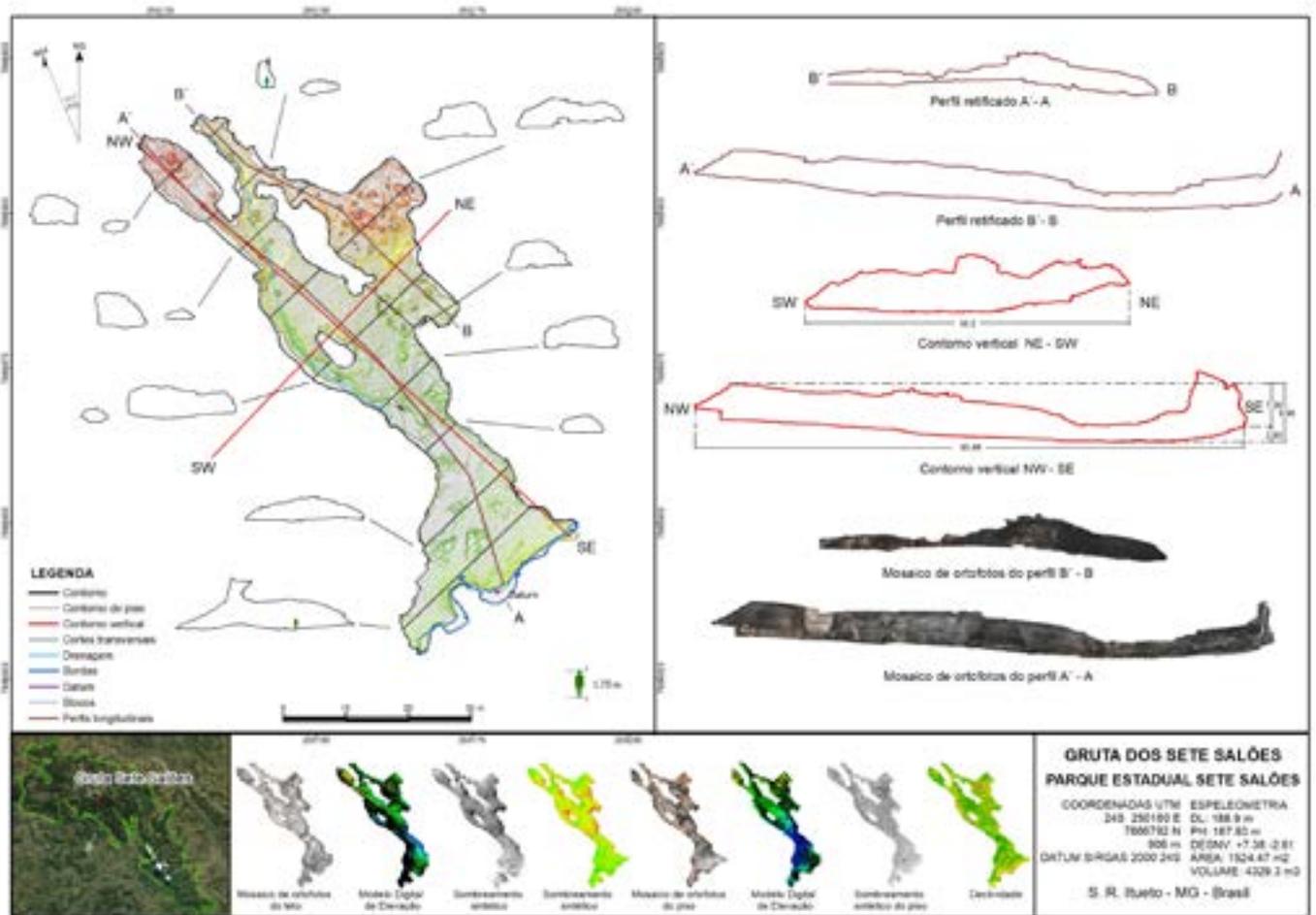


Figura 5 – Mapa com as feições extraídas do modelo fotogramétrico: contorno horizontal (preto), contornos vertical longitudinal e transversal (vermelho), perfis longitudinais (marrom), cortes transversais (preto), curvas de nível e bordas (azul). À direita são vistos os perfis retificados e contornos verticais. Na parte inferior são vistos os mosaicos de ortofotos do piso e do teto, sombreamento sintético do teto e do piso e mapa de declividade do piso.

Figure 4 – Map with the features extracted from the photogrammetric model: horizontal contour (black), vertical longitudinal and transversal contours (red), longitudinal profiles (brown), cross-sections (black), contour lines and edges (blue). On the right are the rectified profiles and vertical contours. At the bottom are floor and ceiling orthophoto mosaics, ceiling and floor shading and floor slope map.

E de forma a inserir o modelo da cavidade na topografia local¹⁶ foi feita a junção ao modelo de superfície da área por meio do software InfraWorks 2019, que se utiliza de um MDE e imagem de satélite de alta resolução do provedor Bing Maps.

In order to insert the cavity model into the local¹⁶ topography, it was joined to the surface model of the area through InfraWorks 2019 software, which uses a DEM and high-resolution satellite image from Bing Maps provider.

16 Disponível em <https://skfb.ly/6YtEB>.

16 Available at: <https://skfb.ly/6YtEB>.

A Mina do Veloso

A Mina do Veloso foi escavada em rochas itabiríticas ricas em minerais magnéticos, resultando em interferência nas leituras dos azimutes, como experimentado pela Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE durante o mapeamento convencional realizado em 2014 (Gomes, 2016). Para evitar essa possibilidade de interferência magnética, foi colocada uma estação topográfica no exterior da cavidade (T0) de onde foram feitas visadas em pontos externos (T1 e T2) e em dois pontos internos (T3 e T4), o último situado a 42 m de distância da entrada. Tais medidas foram feitas com bússola de geólogo tipo Brunton sobre tripé e trena laser com clinômetro. O tratamento dos dados topográficos foi feito pelo software Compass, que considerou as coordenadas UTM tomadas com receptor GNSS de navegação em T0, datum SIRGAS 2000 e fuso 23S.

O levantamento fotogramétrico foi realizado na área interna do receptivo turístico, no conduto principal e nas galerias laterais, correspondendo à totalidade da mina, excluindo-se locais com possível risco geotécnico nas extremidades do salão principal. As fotos foram tomadas com câmera Nikon P900 e iluminação auxiliar com painel de LED. Do total de 4361 fotos, 4040 foram alinhadas no software Agisoft Metashape com alta resolução. O modelo resultou em 5.535.882 pontos de ligação (tie-points), 4023 mapas de profundidade, nuvem com 77.881.749 pontos e 9.352.815 faces. As bases topográficas anteriormente levantadas foram utilizadas como pontos de controle e o erro médio resultante foi de 0,553 m. Eliminado o ponto T3, o erro resultou em 0,349 m.

A regularidade do piso e baixa inclinação do conduto principal não justificaram a geração de mosaico de ortofotos e nem modelo de elevação. Os mosaicos de ortofotos foram gerados apenas para as paredes visando a representação dos planos de acamamento da rocha, das litofácies e estruturas associadas, para subsidiar futuros levantamentos geológicos. A homogeneidade tonal do piso resultou em uma rugosidade excessiva em alguns trechos do modelo, problema decorrente do processamento das imagens. No entanto, a redundância na cobertura fotográfica

Veloso Gold Mine

The Veloso Gold Mine was excavated in itabirite rocks rich in magnetic minerals, resulting in interference in azimuth readings, as experienced by the SEE during conventional mapping conducted in 2014 (Gomes, 2016). To avoid this possibility of magnetic interference, a topographic station was placed outside the cavity (T0) from where views were taken at external points (T1 and T2) and at two internal points (T3 and T4), the latter located 42 m away from the entrance. These measurements were made with a Brunton-type geologist's compass on a tripod and a laser distance measure device with clinometer. The processing of the topographical data was done by Compass software, which considered the UTM coordinates taken with a GNSS navigation receiver at T0, SIRGAS 2000 datum and 23S zone.

The photogrammetric survey was carried out in the internal area of the tourist reception area, in the main shaft and in the lateral galleries. This corresponded to the entire mine, apart from sites with possible geotechnical risk at the extremities of the main hall. The photos were taken with a Nikon P900 camera and auxiliary lighting with a LED panel. Of the total 4,361 photos, 4,040 were aligned in Agisoft Metashape software at high resolution. The model resulted in 5,535,882 tie-points, 4,023 depth maps, a cloud with 77,881,749 points and 9,352,815 faces. The previously surveyed topographic bases were used as control points and the resulting average error was 0.553 m. Eliminating point T3, the error resulted in 0.349 m.

The regularity of the floor and the low inclination of the main conduit did not justify the generation of an orthophoto mosaic or elevation model. The orthophoto mosaics were generated only for the walls in order to represent the bedding planes of the rock, lithofacies and associated structures, and to support future geological surveys. The tonal homogeneity of the floor resulted in excessive roughness in some sections of the model. However, the redundancy in the photographic coverage and adequate lighting contributed to minimize occlusions and holes, identi-

e iluminação adequada contribuíram na minimização das oclusões e de buracos, identificados por análise visual e fechados por ferramentas de edição do software 3D Reshaper.

A extração vetorial automática foi utilizada para a obtenção do contorno horizontal da cavidade em 2D, dos contornos verticais longitudinal e transversal, de perfis longitudinais e cortes transversais. Estes procedimentos foram realizados no software 3D Reshaper 2018, sendo os vetores exportados para a edição no AutoCAD 2018.

O Desenvolvimento Linear (DL) não foi calculado, dada a planicidade da cavidade. Em cavidades com essa característica, utiliza-se a projeção horizontal (PH), calculada enquanto soma-tória dos segmentos de reta representativas do desenvolvimento tomados em planta e que resultou em 341,16 m de extensão (Tabela 2). A área da mina em planta foi calculada em 622,25 m², subtraídas as áreas dos pilares. O contorno vertical longitudinal forneceu o valor de 193,52 m de comprimento, desnível positivo de 5,18 m e negativo de 6,17 m, totalizando 11,35 m de altura. O volume foi calculado em 889,89 m³.

O conduto principal possui um perfil ligeiramente inclinado com cerca de 0,3° de aclave, projetado de forma a escoar fluxos d'água em períodos de maior pluviosidade. O cálculo da inclinação é um valor aproximado em razão do assoreamento na parte inicial do conduto e dos deslocamentos do teto terem alterado a morfologia original (Figura 6)..

fied by visual analysis and closed by the editing tools of the 3D Reshaper software.

Automatic features extraction was used to obtain the horizontal contour of the cavity in 2D, the vertical longitudinal and transverse contours, longitudinal profiles and cross-sections. These procedures were performed in 3D Reshaper 2018 software, and the vectors were exported for editing in AutoCAD 2018.

The Linear Development (LD) was not calculated due to the flatness of the cavity and the map length was used, as is normal in cavities with this characteristic. That resulted in 341.16m (Table 3), calculated as the sum of the line segments representing the development taken in floor plan. The floor plan area of the mine was calculated to be 622.25m², subtracting the areas of the pillars. The longitudinal vertical contour provided the value of 193.52m in length, a positive gradient of 5.18m and a negative gradient of 6.17m, totaling 11.35m in height. The volume was calculated as 889.89 m³.

The main conduit has a slightly inclined profile with about 0.3° slope, designed in order to drain water flows in periods of heavy rainfall. The calculation of the slope is an approximate value due to silting in the initial part of the conduit and the roof slippages have altered the original morphology (Figure 6).

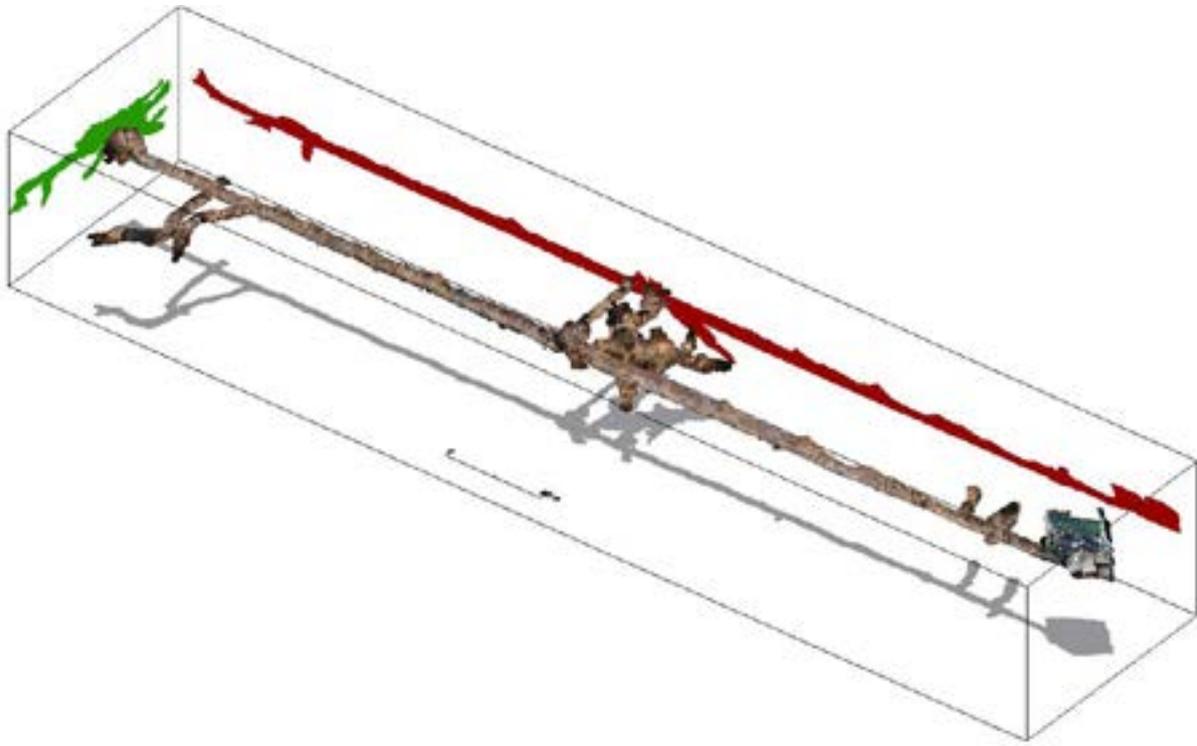


Figura 6 – Perspectiva isométrica SW-NE da projeção da nuvem de pontos do modelo 3D da Mina do Veloso (ao centro) em planta baixa (cinza), contorno vertical longitudinal (vermelho) e contorno vertical transversal (verde). Disponível em <https://skfb.ly/op6jn>.

Figure 6 – Isometric SW-NE perspective of the point cloud projection of Veloso Gold Mine 3D model (center) in floor plan (gray), vertical longitudinal contour (red) and vertical transverse contour (green). Available at <https://skfb.ly/op6jn>.

De forma a avaliar o rigor geométrico do modelo gerado no que se refere à escala, foram extraídas as medidas do comprimento do conduto principal e da altura de teto de 14 cortes transversais para comparação com as medidas tomadas em campo. Os locais para a extração dos cortes foram definidos a partir de variações significativas nas alturas do teto, de forma a facilitar a identificação em campo. Os resíduos, ou seja, as diferenças entre os valores medidos em campo e os valores extraídos do modelo variaram entre -0,14 a 0,07 m, apresentando resultados bastante baixos (0-10 mm) para ao menos seis dos 14 cortes. Cortes próximos apresentaram valores discrepantes, como nos casos dos pares C e D, E e F, G e H (Tabela 2 e Figura 7).

In order to evaluate the geometric accuracy of the generated model in terms of scale, the main conduit length and ceiling height measurements of 14 cross sections were extracted for comparison with the measurements taken in the field. The locations for the extraction of the sections were defined from significant variations in the ceiling heights, in order to facilitate identification in the field. The residuals, i.e., the differences between the values measured in the field and the values extracted from the model ranged from -0.14 to 0.07 m, showing very low results (0-10 mm) for at least six of the 14 sections. Close sections showed discrepant values, as in the cases of pairs C and D, E and F, G and H (Table 2 and Figure 7).

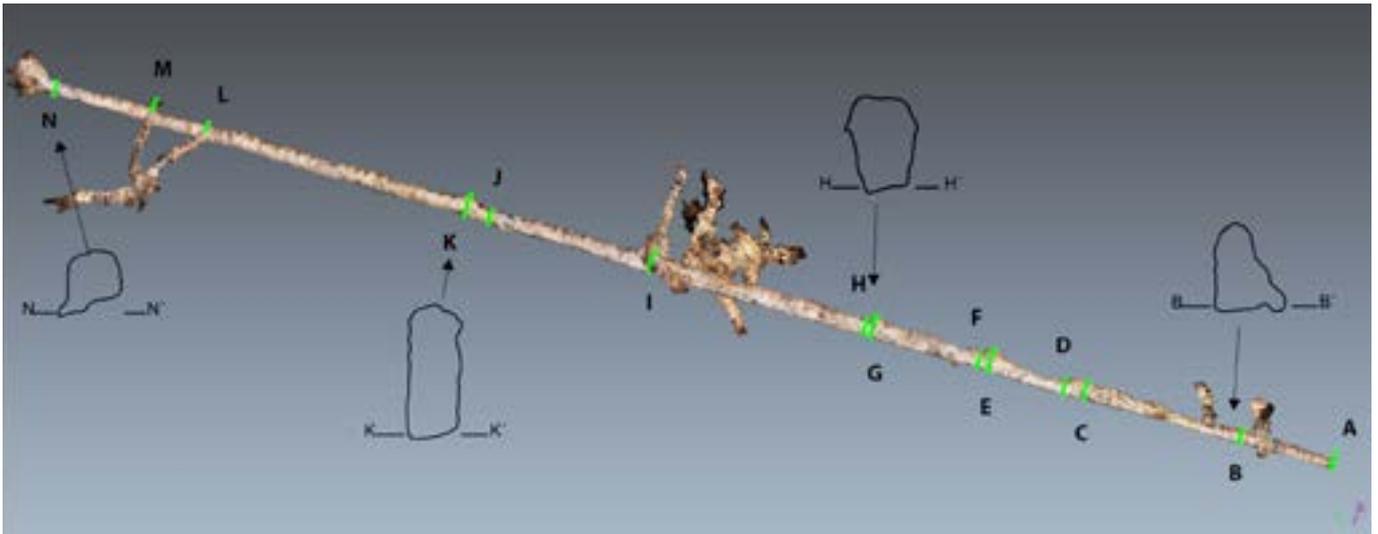


Figura 7 – Representação dos cortes transversais extraídos automaticamente do modelo fotogramétrico da Mina do Veloso.

Figure 7 – Representation of the cross-sections automatically extracted from Veloso Gold Mine photogrammetric model.

O comprimento do conduto principal medido em campo foi de 190,9 m e o comprimento extraído do modelo de 191,3 m, valor 0,21% maior. O valor obtido, por estar abaixo de 1%, enquadraria o levantamento no grau 6 da UIS no, que se refere à escala, 4 para o detalhamento do desenho e F para o sufixo de qualificação (Figura 8).

The length of the main conduit measured in the field was 190.9 m and the length extracted from the model was 191.3 m (0.21% larger). For being below 1%, the value obtained would fit UIS grade 6 regarding the scale, grade 4 for the detailing of the design and F for the qualification suffix (Figure 8).



Figura 8 – Erro médio quadrático relativo dos pontos de controle e posicionamento do modelo 3D da Mina do Veloso emitido pelo relatório de processamento do software Agisoft Metashape.

Figure 8 – Veloso Gold Mine 3D model control points and positioning relative mean square error. Issued by the Agisoft Metashape software processing report.

O posicionamento espacial do modelo foi avaliado pelo erro médio quadrático que apresentou um valor de 34,98 cm, muito superior ao resultado da Gruta dos Sete Salões, apesar do mesmo método de levantamento topográfico e instrumentos. O menor erro em Z evitou rotação no eixo X, mantendo a baixa inclinação do modelo, enquanto as variações em X e Y podem ter afetado a declinação magnética (Tabela 3).

Deformações do modelo não foram identificadas por análise visual, sendo notória a linearidade do conduto, tanto em planta, quanto em perfil.

Tal qual a Gruta dos Sete Salões, o modelo 3D da Mina do Veloso foi integrado a um modelo de superfície¹⁷ por meio de software Infravorks 2019, permitindo a análise da inserção da cavidade na morfologia local.

The spatial positioning of the model was evaluated by the mean square error that presented a value of 34.98 cm. Despite using the same topographic survey method and instruments, this result was much higher than the one of Sete Salões Cave, probably due to the magnetic interference of the rocks (Table 3).

Deformations of the model were not identified by visual analysis, and the linearity of the conduit was evident both in plan and in profile.

Similar to Sete Salões Cave, Veloso Gold Mine 3D model was integrated with a surface model¹⁷ using Infravorks 2019 software, allowing analysis of the insertion of the cavity into the local morphology.

Tabela 2 - Diferenças entre as medidas (em metros) das alturas de teto de 14 cortes transversais tomadas em campo e extraídas do modelo 3D.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Medido	1,65	2,12	2,64	1,6	3,38	2,15	3,27	2,19	3,14	1,94	3,13	1,87	1,76	1,24
Extraído	1,64	2,12	2,62	1,66	3,42	2,16	3,24	2,19	3,18	1,95	3,14	1,8	1,9	1,19
Resíduo	0,01	0	0,02	-0,06	-0,04	-0,01	0,03	0	-0,04	-0,01	-0,01	0,07	-0,14	0,05

Méd.	-0,01	Mín.	-0,14	Máx.	0,07	Var.	0,003	St.D.	0,051
------	-------	------	-------	------	------	------	-------	-------	-------

Table 2 - Differences between measurements (in meters) of the ceiling heights of 14 cross-sections taken in the field and extracted from the 3D model.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Measured	1,65	2,12	2,64	1,6	3,38	2,15	3,27	2,19	3,14	1,94	3,13	1,87	1,76	1,24
Extracted	1,64	2,12	2,62	1,66	3,42	2,16	3,24	2,19	3,18	1,95	3,14	1,8	1,9	1,19
Residual	0,01	0	0,02	-0,06	-0,04	-0,01	0,03	0	-0,04	-0,01	-0,01	0,07	-0,14	0,05

Mean	-0,01	Min.	-0,14	Max.	0,07	Var.	0,003	St.D.	0,051
------	-------	------	-------	------	------	------	-------	-------	-------

¹⁷ Disponível em: <https://skfb.ly/6Yruv>.

¹⁷ Available at: <https://skfb.ly/6Yruv>.

Tabela 3 - Valores do erro médio quadrático e das componentes dos pontos de controle para a Mina do Veloso dados em centímetros. X = leste; Y = norte; Z = altitude.

RÓTULO	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
T0	-39.8958	-26.3506	-2.94107	47.9028	1.130 (603)
T1	-11.2298	25.2558	-4.35555	27.981	0.342 (358)
T2	40.7195	-0.652562	6.62425	41.26	3.113 (48)
T4	10.4061	1.74737	0.672375	10.5732	-2.769 (16)
TOTAL	29.5133	18.2735	4.24127	34.9707	1.169

Table 3 - Mean square error and control point component values for Veloso Gold Mine given in centimeters. X = east; Y = north; Z = altitude.

CGP	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
T0	-39.8958	-26.3506	-2.94107	47.9028	1.130 (603)
T1	-11.2298	25.2558	-4.35555	27.981	0.342 (358)
T2	40.7195	-0.652562	6.62425	41.26	3.113 (48)
T4	10.4061	1.74737	0.672375	10.5732	-2.769 (16)
TOTAL	29.5133	18.2735	4.24127	34.9707	1.169

DISCUSSÕES

Este trabalho procurou demonstrar tecnologias e procedimentos para a geração de mapas espeleológicos por meio da automação de processos de extração e edição vetoriais, além da geração de produtos cartográficos a partir de modelos fotogramétricos tridimensionais. Destacam-se a precisão geométrica, a qualidade visual, a agilidade e custos dos produtos cartográficos, tanto quanto as novas formas de representação e facilidades no compartilhamento ou divulgação dos mapas produzidos. Adicionalmente, a integração do modelo de uma cavidade a um modelo superficial visa contribuir com novos elementos para análise geográfica e seus elementos constitutivos.

Os mapas espeleológicos 3D adotam o formato DWG e contêm os elementos clássicos de representação do mapeamento espeleológico como plantas baixas, perfis longitudinais e cortes trans-

DISCUSSIONS

This study sought to demonstrate technologies and procedures for generating speleological maps through the automation of features extraction and vector editing processes, as well as the generation of cartographic products from three-dimensional photogrammetric models. The highlights are the geometric accuracy, visual quality, agility, and cost of the cartographic products, besides the new forms of representation and facilities for sharing or disseminating the maps produced. Additionally, the integration of a cavity model with a surface model aims to contribute new elements for geographic analysis and its constituent elements.

The 3D speleological maps can be composed in AutoCAD or ArcGIS Desktop and contain the classic elements of representation of speleological mapping as floor plans, longitudinal

versais gerados de forma automática, sendo que a intervenção humana se deu apenas na definição da localização dos planos a serem representados. Outros elementos de representação pouco usuais como os contornos verticais longitudinal e transversal se somam aos já tradicionais.

Além das variáveis espeleométricas usuais, como a projeção horizontal (PH), desenvolvimento linear (DL), área e desnível, foi possível calcular os volumes, desníveis ascendente e descendente, comprimentos, larguras e alturas das cavidades (Tabela 4). Análises adicionais como área média dos cortes, altura média do teto, entre outras possibilidades, são facilmente implementáveis.

profiles and cross sections generated automatically. Human intervention was only in defining the location of the planes on the models to be represented. Other unusual representation elements such as vertical longitudinal and transversal contours were added to the traditional ones.

Besides the usual speleometric variables such as map length (ML), linear development (LD), area and depth it was possible to calculate volumes, ascending and descending gradients, lengths, widths and heights of the cavities (Table 4). Additional analyses such as average area of the sections, average ceiling height, among other possibilities, are easily implementable.

Tabela 4 - Variáveis espeleométricas obtidas a partir dos modelos 3D para as cavidades pesquisadas.

Cavidade	PH (m) ¹⁸	DL (m)	Desn. (m)	Comp. (m)	Larg. (m)	Altura (m)	Vol. (m ³)	Area (m ²)
Gruta Sete Salões	187,93	188,9	+6,92 -2,61	93,48	55,22	9,53	4.329,3	1.524,47
Mina do Veloso	341,16	-	+5,18 -6,17	193,52	42,89	11,35	889,89	622,25

Table 4 - Speleometric variables obtained from the 3D models of the investigated cavities.

Cavity	ML (m) ¹⁸	LD (m)	Depth (m)	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Vol. (m ³)	Area (m ²)
Sete Salões Cave	187,93	188,9	+6,92 -2,61	93,48	55,22	9,53	4.329,3	1.524,47
Veloso Gold Mine	341,16	-	+5,18 -6,17	193,52	42,89	11,35	889,89	622,25

18 A variável espeleométrica Projeção Horizontal (PH) em português é equivalente a map length, em inglês, de acordo com Chabert et al. (1981).

18 The speleometric variable Horizontal Projection (PH) in Portuguese is equivalent to map length, in English, according to Chabert et al. (1981).

Foi possível realizar a validação geométrica do modelo da Mina do Veloso por meio da diferença entre medidas extraídas do modelo digital e medidas tomadas em campo no ponto correspondente. Os valores baixos para as medidas tomadas das alturas do teto nos cortes transversais demonstram que o modelo manteve a escala invariável, mesmo com os pontos de controle estando restritos ao trecho inicial da cavidade.

A diferença entre a medida de desenvolvimento do conduto principal, dada pela projeção horizontal (PH) extraída do modelo e a medida em campo, reforça essa afirmação. Os valores diferentes para os resíduos das alturas de teto de cortes próximos também reforçam a ideia de que tais discrepâncias se deram por deslocamentos no posicionamento do instrumento na realização da medição face às irregularidades do piso e do teto e não por deformações de escala.

No que se refere ao posicionamento espacial dos modelos fotogramétricos destaca-se a acurácia da topografia obtida para a Gruta dos Sete Salões. O mesmo não pode ser verificado na Mina do Veloso. A análise do erro quadrático médio leva a crer que possa ter havido interferência magnética, apesar dos cuidados tomados.

A avaliação da inclinação ascendente do modelo não pôde ser feita de forma precisa em função das alterações da topografia original por assoreamento e deslocamentos do teto. A declividade tem a função de drenar as águas subterrâneas para o exterior por meio de um canal ao longo da parede, particularmente em épocas de maior pluviosidade.

A graduação de classificação da acurácia da topografia, nível de detalhamento dos croquis e o qualificativo não contemplam os modelos fotogramétricos ou por perfilamento a laser, o que abre a necessidade de discussões sobre o tema e adequação deste instrumento de avaliação a esses novos métodos de levantamento.

Análises visuais permitiram identificar oclusões e buracos nos modelos das duas cavidades, tanto quanto estruturas geológicas nos mosaicos de ortofotos de paredes, como o acamamento e variações litológicas na Mina do Veloso.

It was possible to perform the geometric validation of Veloso Gold Mine model through the difference between measurements extracted from the digital model and measurements taken in the field at the corresponding point. The low values for the residues between the measurements of the ceiling heights taken in the field and extracted from the model demonstrate that the model kept the invariable scale even with the control points being restricted to the initial section of the cavity.

The difference between the measurements of main conduit development given by the map length (ML) extracted from the model and the measurement in the field reinforces this statement. The different values for the residuals of the ceiling heights of nearby sections also reinforce the idea that such discrepancies were due to displacements in the positioning of the instrument in carrying out the measurement related to the floor and ceiling irregularities and not by scale deformations.

With regard to the spatial positioning of the photogrammetric models, the accuracy of the topography obtained for the Sete Salões Cave stands out. The same cannot be verified at Veloso Gold Mine. The mean square error analysis leads to believe that there may have been magnetic interference, despite the efforts taken to avoid it.

The evaluation of the upward slope of the model could not be done accurately due to changes in the original topography by siltation and roof slippage. The slope has the function of draining out groundwater through a channel along the wall, particularly in times of heavy rainfall.

The grading for classifying the accuracy of the topography, the level of detail of the sketches, and the qualifier do not include other methods like photogrammetric models or laser profiling. This, opens up the need for discussions on the subject and adaptation of this evaluation instrument to these new survey methods.

A iluminação é fator determinante no alinhamento e estabelecimento dos pontos de ligação (tie-points) entre as fotos. Sua deficiência acarreta na diminuição do número de fotos alinhadas e pode causar oclusões. Na Mina do Veloso, a iluminação mostrou-se suficiente para o conduto principal, estreito e com teto baixo. No salão principal, as extremidades mostraram-se mal iluminadas, dificultando a delimitação dos contornos e causando oclusões e buracos. A homogeneidade tonal dos pisos ocasionou oclusões, buracos e rugosidade excessiva em regiões das duas cavidades. É possível que fotos tomadas em uma maior altura e melhor iluminação possam amenizar este problema, comum em levantamentos fotogramétricos.

O volume de dados de projetos dessa natureza é grande e necessita de capacidade computacional e de armazenamento equivalentes, sendo que as versões dos modelos para divulgação on line precisam ser simplificadas para atender os requisitos dos repositórios. Os processamentos devem ser feitos em máxima resolução possível, já que tentativas em menor resolução resultaram em modelos ligeiramente deformados.

A continuidade dos levantamentos está prevista e deverá contemplar procedimentos próprios da Geodésia não realizados nesta fase como a calibração de câmera, execução de um levantamento topográfico passível de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (softwares Adjust ou Compass) e utilização de pontos de verificação (checkpoints). Será avaliada, também, a reprodutibilidade dos procedimentos de extração vetorial em modelos por nuvens de pontos geradas por varreduras a laser.

Os resultados levam à conclusão de que a geração de mapas espeleológicos por meio de modelos fotogramétricos mostra-se como alternativa ao método de mapeamento convencional por topografia e elaboração de croquis. Sua utilização independe da origem da cavidade, podendo ser natural (caverna), biológica (paleotoca) ou antrópica (minas de ouro) e poderá ser aplicada também em modelos constituídos por nuvens de pontos de levantamentos a laser.

Visual analyses have allowed us to identify oclusions and holes in the models of the two cavities, as well as geological structures in Veloso Gold Mine orthophoto wall mosaics, such as bedding and lithological variations.

Lighting is a determining factor in the alignment and establishment of tie-points between photos. Its deficiency reduces the number of aligned photos and can cause oclusions. For the main conduit at Veloso Gold Mine the lighting was sufficient, due to the low ceiling and narrow width. In the main hall, the edges were poorly lit, making it difficult to delimit the contours, which caused oclusions and holes. The tonal homogeneity of the floors originated holes and excessive roughness in regions of the two cavities. It is possible that photos taken at a greater height and better lighting could alleviate this problem.

The data volume from projects of this nature is large and requires equivalent computational and storage capacity. Moreover, for online dissemination, the versions of the models need to be simplified to meet the repositories requirements. Processing should be done at the highest resolution possible, as attempts at lower resolution have resulted in slightly deformed models.

The continuity of the surveys is foreseen and should include Geodesy's own procedures not performed in this phase. Such as camera calibration, execution of a topographic survey that can be adjusted by the least square method (Adjust or Compass software) and use of checkpoints. The reproducibility of the features extraction procedures in point cloud models generated by laser scans will also be evaluated.

The results lead to the conclusion that the generation of speleological maps through photogrammetric models is an alternative to the conventional mapping method. Its use is independent of the origin of the cavity, and may be natural (cave), biological (paleoburrow) or anthropic (gold mines). In addition, it can be applied to models consisting of point clouds from laser surveys.

A utilização de modelos, fotogramétricos ou de nuvens de pontos por escaneamento a laser, abre novas possibilidades de representação e construção de mapas espeleológicos 3D em ambiente totalmente digital e de forma automatizada, passível de avaliação da precisão de sua geometria e de seu posicionamento espacial. A acurácia destes modelos depende diretamente de uma topografia de precisão passível de ajustamento das observações e da calibração da câmera e de instrumentos de medição, procedimentos próprios da Geodésia, a serem contemplados em levantamentos futuros.

Espera-se que o fluxo de trabalho apresentado possa servir de roteiro metodológico básico e que incentive a utilização e desenvolvimento da automação do mapeamento espeleológico suportado por modelos tridimensionais.

AGRADECIMENTOS

À Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE/UFOP, pela experiência proporcionada e apoio em trabalhos de campo. Ao Programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná- UFPR, pelo suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa. À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos. Ao Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia - GEENG, pelo suporte operacional.

The use of photogrammetric models or point clouds by laser scanning opens new possibilities for the representation and construction of 3D speleological maps. It is done in a fully digital environment and in an automated way, capable of evaluating the accuracy of its geometry and spatial positioning. The accuracy of these models depends directly on a precision topography that can adjust the observations and the calibration of the camera and measuring instruments, procedures proper to Geodesy, to be considered in future surveys.

It is expected that the workflow presented can serve as a basic methodological roadmap and will encourage the use and development of the automation of speleological mapping supported by three-dimensional models.

ACKNOWLEDGMENTS

To the Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE/UFOP, for the provided experience and support in field works. To the Graduate Program in Geodesic Sciences of the Federal University of Paraná - UFPR, for the support to the development of this research. To CAPES, for granting the scholarship. To the Laboratory of Engineering Applied to Geodesy - GEENG, for the operational support.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

RADOSLOVICH, E. W. The Structure of Muscovite, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$. *Acta Crist.* 13, p. 919-932, ALESSANDRI, L.; BAIOCCHI, V.; DEL PIZZO, S.; CIACCIO, F. DI; ONORI, M.; ROLFO, M. F.; TROISI, S.; A flexible and swift approach for 3D image-based survey in a cave. *Applied Geomatics*, Rome, 15 p, 2020.

ARAÚJO, R. N. *Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Cavidade Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual*. 2016. 112 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. *As Grandes Cavernas do Brasil*. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 227 p. 2001.

BAETA, A. Grutas e Abrigos "Encantados". Parque Sete Salões Serra Takrukkrak. Vale do Rio Doce - MG. *Revista O Carste*, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, p. 68-75, 2000.

CALUX, A. Espeleometria no contexto do licenciamento ambiental. In: Simpósio de Espeleologia e Legislação Ambiental, I, Ouro Preto. 45p. 2018.

CAVALCANTI, J. A. D. Mapeamento Espeleológico. Ouro Preto: Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE. 1996.

CHALIKAKIS, K.; PLAGNES, V.; GUERIN, R.; VALOIS, R.; BOSCH, F. P. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview. *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 6, p. 1169-1180, 2011.

CORVI, M. Cave surveying in 2017. 2017. Disponível em: <<http://marcocorvi.altervista.org/caving/notes/Varenna-20170429.pdf>>. Acesso em 15 de março de 2021.

FERREIRA, E. E. *Patrimônio mineiro na Serra do Veloso em Ouro Preto-MG: registro análise e proposição de circuitos geoturísticos interpretativos*. 2017. 148 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

GAMA, M. DA; BRAGA, M. A.; BARBOSA, M. R.; DE PAULA, R.; BRANDI, I. Geophysics applied to litho-structural mapping of iron caves, Carajás, Brazil. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef, 16th. 2019. Brazilian Geophysical Society, p.1-5. 2019. Disponível em: <https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/16th_CISBGf/session/NEAR_SURFACE/Geophysics_applied_to_litho-structural_mapping_of_iron_caves_Carajás_Brazil.pdf>. Acesso em 06 de abril de 2021.

GOMES, R. M. A. *Estudo Geomecânico da Antiga Mina Subterrânea de Ouro, Mina Du Veloso, Em Ouro Preto - MG*. 2016. 81 p. Monografia. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

GROHMANN, C. H.; ZACHARIAS, G.; GARCIA, G. P. B.; *et al.* Mapeamento e Modelagem 3D Do Setor Turístico da Caverna do Diabo (SP) Com Laser Scanner: Resultados Preliminares. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35º, 2019, Bonito - MS. Sociedade Brasileira de Espeleologia. p.201-206, 2019.

HEEB, B. *Paperless Caving - An Electronic Cave Surveying System*. 2008. Disponível em <<https://paperless.bheeb.ch/download/PaperlessCaving.pdf>>. Acesso em 21 de maio de 2012.

HOOVER, R. A. Geophysical Choices for Karst Investigations. In: Multidisciplinary Conference on Sinkholes & the Engineering and Environmental Impacts of Karst, 9th.. Hunstville, p.529-538, 2003.

ICMBio/CECAV. Revisão da Instrução Normativa MMA nº2/2009. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Brasília, 2013. Disponível em: < https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/Comite_IN/Reuniao_07/Ap_IN2_7ReuniaoComite_Cecav01.pdf>.

IDREES, M. O.; PRADHAN, B. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology*, v. 45, n. 1, p. 71-88, 2016.

LIMA, M. T. Computação Aplicada à Topografia de Cavernas. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 40, n. 4, p. 28-30, 1987.

LOTT, C. F. Cartografia espeleológica: dos mapas primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. *Pedagogia em Ação*, v. 5, n. 1, p. 82-101, 2014.

MLENEK, D. C.; ARENAS, F. C.; FERREIRA, F. J. F.; *et al.* Modelagem Tridimensional da Caverna Buraco do Inferno na Rodovia BR-135 no Município de São Desidério – BA. Congresso Brasileiro de Cartografia , 27. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, p.193-197, 2017.

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, n. 1, p. 1-21, 1991. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/103/1/1-21/182484>>. Acesso em 30 de janeiro de 2021.

SÁNCHEZ, L. E. Graus de Precisão em Topografia de Caverna. Congresso Nacional de Espeleologia, 14o. Belo Horizonte. p.49-50, 1980.

SIMÕES, P. R. *Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG*. Ouro Preto, 2019. Disponível em <<https://see.ufop.br/revista-espeleologia-digital>>. Acesso em 20 de julho de 2020.

SOCIEDADE BRASILEIRA ESPELEOLOGIA. *Normas e Convenções Espeleométricas*. Campinas, 1991.

TRIMMIS, K. P. Paperless mapping and cave archaeology: A review on the application of DistoX survey method in archaeological cave sites. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 18, n. January, p. 399-407, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352409X1730768X>>. Acesso em 18 de agosto de 2021.

TSAKIRI, M.; SIGIZIS, K.; BILLIRIS, H.; DOGOURIS, S. 3D laser scanning for the documentation of cave environments. In: ACUUS International Conference - Underground Space: Expanding the Frontiers, 11th, p. 403-408. 2007.

RB Esp

Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

