

VRB Esp

Revista Brasileira de ESPELEOLOGIA

Edição Especial, V.01 - Nº 13 de 2024
ISSN 2179.4952

EDIÇÃO ESPECIAL

2º Prêmio
Nacional
de Espeleologia



Michel
Le Bret



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
2024



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, Natal, 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.

Me. Xavier Prous

Analista de Meio Ambiente na Gerência de Espeleologia da Mineradora Vale S.A.

Coordenação editorial

Javiera de la Fuente C.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Projeto gráfico

Bruno Silva Bastos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Diagramação

Júlia Mendes Araújo

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Foto da capa

Gruta Ermida, Almirante Tamandaré /PR / **Rodrigo Lopes Ferreira**

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Revista Brasileira de Espeleologia. Edição Especial – 2º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret / Julio Ferreira da Costa Neto e Jocy Brandão Cruz (ed.) – Brasília: ICMBio, 2024.

ISSN 2179.4952 - Online

368 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

7 | SOBRE A REVISTA

8 | EDITORIAL

11 | **MONITORAMENTO TÉRMICO DE *BAT CAVES* NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS**
THERMAL MONITORING OF BAT CAVES IN THE CARAJÁS NATIONAL FOREST
Narjara Tércia Pimentel; Enrico Bernard

46 | **DO CONHECIMENTO ECOLÓGICO ÀS POLÍTICAS DE CONSERVAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE FATORES QUE INFLUENCIAM A BIODIVERSIDADE FRENTE À AVALIAÇÃO DE PRIORIDADES PARA A CONSERVAÇÃO**
FROM ECOLOGICAL KNOWLEDGE TO CONSERVATION POLICIES: A CASE STUDY ON FACTORS INFLUENCING BIODIVERSITY IN THE ASSESSMENT OF CONSERVATION PRIORITIES
Lucas Mendes Rabelo; Rodrigo Lopes Ferreira

131

PROTEÇÃO FORNECIDA POR PEQUENA CAVERNA PARA UMA COLÔNIA DE MORCEGOS (*Anoura geoffroyi* GRAY, 1838) DURANTE INCÊNDIO FLORESTAL OCORRIDO NO BRASIL

PROTECTION PROVIDED BY A SMALL CAVE FOR A BAT COLONY (Anoura geoffroyi GRAY, 1838) DURING A FOREST FIRE IN BRAZIL

Aline da Silva Reis; Robson de Almeida Zampaulo

153

RELEVÂNCIA CULTURAL DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO E A POSSIBILIDADE DE SUA TUTELA PELO TOMBAMENTO: crítica ao posicionamento do IPHAN a partir do estudo do caso da Paleotoca na Serra do Gandarela/MG

SPELEOLOGICAL HERITAGE CULTURAL RELEVANCE AND THE POSSIBILITY OF PROTECTING IT THROUGH HERITAGE LISTING: a critique of IPHAN's position based on the case study of the Serra do Gandarela Paleoburrow in MG.

Giselle Ribeiro de Oliveira

187

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E HIDRODINÂMICA DO SISTEMA CÁRSTICO DA GRUTA ÉDEN, PAINS – MG

HYDRODYNAMICS AND INTRINSIC VULNERABILITY OF THE ÉDEN CAVE KARST SYSTEM, PAINS - MG

Pedro Henrique da Silva Assunção; Paulo Henrique Ferreira Galvão; Thiago Nogueira Lucon; Peter Marshall Fleming; Bruno Doi; Tássia Marques

225

VIESES NO CONHECIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE CAVERNAS DO BRASIL

BIASES IN THE KNOWLEDGE OF THE GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL

Rodrigo Antônio Castro-Souza; Nicolas Silva Bosco; Thadeu Sobral-Souza

260

UMA PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DA RELEVÂNCIA DE CAVERNAS NO BRASIL, COM ÊNFASE EM MORCEGOS

CAVE RELEVANCE CLASSIFICATION IN BRAZIL: A PROPOSAL FOCUSED ON BATS

Jennifer de Sousa Barros; Enrico Bernard

318

CONEXÃO HÍDRICA ENTRE AS CAVERNAS QUARTZÍTICAS BROMÉLIAS e MARTIMIANO II, NA SERRA DE IBITIPOCA, MG

HYDRIC CONNECTION BETWEEN THE BROMELIA AND MARTIMIANO II QUARTZITE CAVES, IN THE IBITIPOCA MOUNTAIN RANGE, MG

Gabriel Lourenço Carvalho de Oliveira; Pedro Henrique da Silva Assunção; Paulo Eduardo Santos Lima; Tiago Vilaça Bastos; Isaac Daniel Rudnitzki

339

MAPA DO TESOURO: RIQUEZA DE ESPÉCIES DE *Penicillium* NA CAVERNA LAPA DO BOQUEIRÃO DO CERRADO GOIANO

*TREASURE MAP: RICHNESS OF *Penicillium* SPECIES IN THE LAPA DO BOQUEIRÃO CAVE IN THE CERRADO OF GOIÁS*

Pedro Henrique Félix de Oliveira; Renato Felipe Ferreira Franco; Pedro Thiago Santos Nogueira; Renata Santos Momoli; Cristina Maria de Souza Motta; Jadson Diogo Pereira Bezerra



Coleta de material para estudos genéticos
Floresta Nacional de Carajás/PA
Foto: Diego Medeiros Bento, ICMBio/Cecav



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>

Com muito orgulho trazemos à comunidade acadêmico-científica esta edição especial da Revista Brasileira de Espeleologia (Rbsp), publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav). A revista, lançada em 2010, tem como objetivo a publicação de artigos de pesquisa, resenhas originais, cartas, mapas, ensaios e relatórios relacionados ao patrimônio espeleológico e sua biodiversidade associada.

Nesta edição especial, apresentamos os artigos produzidos pelos vencedores do 2º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret, nas categorias Pós-graduação, Ampla Concorrência e Jovem Espeleólogo. A premiação é resultado de uma parceria entre o ICMBio/Cecav e a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), que visa incentivar o desenvolvimento e publicação de pesquisas científicas, inventários e soluções técnicas voltados à conservação do ecossistema cavernícola e suas espécies associadas, bem como auxiliar no manejo de unidades de conservação federais que possuam sistemas cavernícolas entre seus atributos.

A premiação é uma homenagem ao espeleólogo Michel Le Bret, por sua significativa contribuição à espeleologia brasileira. Como um dos fundadores da SBE, destacou-se na exploração, mapeamento, uso de técnicas verticais e de mergulho, contribuindo para a pesquisa e conhecimento do patrimônio espeleológico brasileiro.

Nesta edição, apresentamos os nove artigos vencedores do 2º Prêmio Michel Le Bret de espeleologia:

Categoria ampla concorrência

O artigo “Monitoramento térmico de *bat caves* na Floresta Nacional de Carajás”, de Narjara Tércia Pimentel e Enrico Bernard, traz os resultados do monitoramento em duas *bat caves*, incluindo estimativas de população, padrões de uso dos abrigos e de flutuação na população de morcegos residentes.

O artigo seguinte, intitulado “Do conhecimento ecológico às políticas de conservação: um estudo de caso sobre fatores que influenciam a biodiversidade frente à avaliação de prioridades para a conservação”, de Lucas Mendes Rabelo e Rodrigo Lopes Ferreira, avalia atributos que influenciam nos aspectos ecológicos dos sistemas subterrâneos e seu impacto no índice que determina as cavernas prioritárias para a conservação.

O artigo “Proteção fornecida por pequena caverna para uma colônia de morcegos *Anoura geoffroyi* GRAY, 1838 durante incêndio florestal ocorrido no Brasil” de autoria de Aline da Silva Reis e Robson de Almeida Zampaulo apresenta um estudo sobre as variações microclimáticas na caverna MJ-005 (Brumadinho, MG) durante incêndio florestal, mostrando a importância do ambiente cavernícola para a fauna local.

Categoria pós-graduação

No artigo “A relevância cultural do Patrimônio Espeleológico e a possibilidade de sua tutela pelo tombamento: crítica ao posicionamento do IPHAN a partir do estudo do caso da Paleotoca Serra do Gandarela/MG”, a autora Giselle Ribeiro de Oliveira analisa e confronta a decisão do órgão responsável pelo patrimônio histórico e artístico nacional em não considerar paleotocas como de relevância cultural por falta de indícios de apropriação humana do bem espeleológico.

No artigo “Vulnerabilidade intrínseca e hidrodinâmica do sistema cárstico da Gruta Éden, Pains – MG”, os autores Pedro Assunção, Paulo Galvão, Thiago Lucon, Peter Marshall Fleming, Bruno Doi e Tássia Marques apresentam uma adaptação do método EPIK para mapear zonas de vulnerabilidade do sistema cárstico, associando-o com testes de traçadores para obtenção dos parâmetros de fluxo.

No artigo “Vieses no conhecimento da distribuição geográfica de cavernas no Brasil” de Rodrigo Antônio Castro Souza, Nicolas Silva Bosco e Thadeu Sobral-Souza, os autores, utilizando técnicas de modelagem, discutem as possíveis distorções acerca da distribuição de cavernas no Brasil, a partir da base de dados oficial do Canie.

No artigo “Uma proposta de classificação da relevância de cavernas no Brasil, com ênfase em morcegos”, Jennifer de Sousa Barros e Enrico Bernard apresentam um protocolo de classificação de relevância de cavidades naturais compreendendo três classes de proteção e diversos

Jovem Espeleólogo

No artigo “Conexão hídrica entre as cavernas quartzíticas Bromélias e Martimiano II, na Serra de Ibitipoca, MG”, Gabriel Lourenço Carvalho de Oliveira, Pedro Henrique da Silva Assunção, Paulo Eduardo Santos Lima, Tiago Vilaça Bastos e Isaac Daniel Rudnitzki investigam a existência de conexão hídrica entre cavernas do Parque Estadual do Ibitipoca, com base em análise hidroquímica e utilização de traçadores fluorescentes.

No artigo “Mapa do Tesouro: riqueza de espécies de *Penicillium* na caverna Lapa do Boqueirão do cerrado goiano”, de Pedro Henrique Félix de Oliveira, Renato Felipe Ferreira Franco, Pedro Thiago Santos Nogueira, Renata Santos Momoli, Cristina Maria de Souza Motta e Jadson Diogo Pereira Bezerra, os autores identificam espécies de fungos em ambiente cavernícola, incluindo descrição de novas espécies.

Agradecemos a participação de todos que enviaram seus artigos para o 2º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret, aos revisores e à comunidade científica que vem contribuindo para ampliação do conhecimento acerca dos ambientes cavernícolas e espécies associadas. Convidamos a todos os pesquisadores a enviarem suas contribuições para a revista, divulgando suas pesquisas e trabalhos técnicos relacionados ao patrimônio espeleológico.

Boa leitura a todos!

Editores-Chefes

Jocy Brandão Cruz
Júlio Ferreira da Costa Neto

Editores-Assistentes

Thais Xavier Nunes
Diego de Medeiros Bento
Júlio César Rocha Costa
Claudia Simone da Luz Alves

MONITORAMENTO TÉRMICO DE *BAT CAVES* NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS

THERMAL MONITORING OF BAT CAVES IN THE CARAJÁS NATIONAL FOREST

Narjara Tércia Pimentel

Universidade Federal de Pernambuco
Laboratório de Ciência Aplicada à Conservação
da Biodiversidade, Departamento de Zoologia
E-mail: nanatercia1@yahoo.com.br

Enrico Bernard

Universidade Federal de Pernambuco
Laboratório de Ciência Aplicada à Conservação
da Biodiversidade, Departamento de Zoologia
E-mail: enricob2@gmail.com

RESUMO

Abrigos com populações excepcionais de morcegos são denominados bat caves. Monitorar esse tipo de abrigo pode ser desafiador, dadas as localizações e condições destes ambientes. Entretanto, o monitoramento da temperatura destas cavernas tem sido apontado como um proxy de como os morcegos estão usando esses ambientes. Apresentamos aqui os resultados de um monitoramento térmico detalhado de duas bat caves na Floresta Nacional de Carajás, acompanhado de estimativas das populações de morcegos residentes nestas cavernas, descrição dos padrões diários de saída e retorno dos morcegos nestes abrigos, identificação de possíveis padrões sazonais na flutuação da população residente de morcegos dessas cavernas e identificação das caracterís-

ABSTRACT

Shelters with exceptional bat populations are called bat caves. Monitoring this type of shelter can be challenging, given the locations and conditions of these environments. However, monitoring the temperature of these caves has been pointed out as a proxy for how bats are using these environments. Here the results of a detailed thermal monitoring of two bat caves in the Carajás National Forest are presented, accompanied by estimates of the resident bat populations in these caves. Additionally, a description of the daily patterns of bats leaving and returning to these shelters, identification of possible seasonal patterns in the fluctuation of the resident bat population in these caves and identification of the physical and thermal characteristics preferred by the bats. This thermal monitoring showed that the internal temperatures of

ticas físicas e termais preferidas pelos morcegos. Esse monitoramento térmico apontou que as temperaturas internas destas cavernas são bastante elevadas em relação às temperaturas externas, estando mais associadas à presença de grandes colônias de morcegos do gênero *Pteronotus*. Além disso, observamos um dinamismo nesses ambientes provocados pela movimentação dos morcegos entre os abrigos e variações acentuadas no tamanho das populações em diferentes períodos. O caráter dinâmico observado reforça a necessidade de um monitoramento contínuo e de longo prazo para o melhor entendimento destes abrigos e de suas relações ecológicas. Inventários curtos e esporádicos nesses ambientes inevitavelmente levarão a conclusões equivocadas, com sérias implicações ecológicas, conservacionistas e de licenciamento. Sendo assim, bat caves precisam de um acompanhamento diferenciado em relação ao uso e pressões que experimentam, principalmente frente às alterações e tentativas de flexibilizações que vêm ocorrendo na legislação espeleológica brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: *bat caves*, monitoramento térmico, Floresta Nacional de Carajás, gênero *Pteronotus*

INTRODUÇÃO

No Brasil são reconhecidas 182 espécies de morcegos (Garbino *et al.*, 2022). Várias destas espécies refugiam-se em cavernas, que são consideradas abrigos estáveis e protegidos de intempéries, sendo os morcegos alguns dos poucos vertebrados que usam esses abrigos permanentemente (Altringham, 1996). A utilização desses abrigos é vital para a sobrevivência de morcegos e seu sucesso reprodutivo, pois

*these caves are quite high in relation to the external temperatures, and are more associated with the presence of large colonies of bats of the *Pteronotus* genus. Furthermore, a dynamism in these environments was observed, caused by the movement of bats between shelters and marked variations in population size at different times. The dynamic nature observed reinforces the need for continuous, long-term monitoring in order to better understand these shelters and their ecological relationships. Short, sporadic inventories in these environments will inevitably lead to erroneous conclusions, with serious ecological, conservation and licensing implications. As such, bat caves need special monitoring in relation to the use and pressures they experience, especially in the face of the changes and attempts to make Brazilian speleological legislation more flexible.*

KEYWORDS: *bat caves*, thermal monitoring, Carajás National Forest, *Pteronotus* genus.

INTRODUCTION

Brazil is home to 182 bat species (Garbino et al., 2022). Several of these species take refuge in caves, which are considered to be stable shelters protected from the elements, and bats are some of the few vertebrates that use them permanently (Altringham, 1996). The use of these shelters is vital for the survival of bats and their reproductive success, as they provide places for mating, raising young, social interaction, food digestion,

fornecem locais para acasalamento, criação de filhotes, interação social, digestão alimentar, diminuem os custos da termorregulação, além de proteção contra variações climáticas e predadores. Por causa desses fatores, certas espécies de morcegos tendem a formar grandes colônias em ambientes cavernícolas (Altringham, 1996) e/ou viver em coabitação com outras espécies (Kunz, 1982; Trajano, 1985, 1995).

Morcegos detêm os recordes de maiores congregações entre os mamíferos, chegando a situações onde milhões de indivíduos convergem para um único abrigo. Abrigos com populações excepcionais de morcegos são denominados como *bat caves* e/ou *hot caves* (e.g. Ladle et al., 2012). Esses locais são abrigos bastante peculiares, com temperaturas frequentemente ultrapassando os 35°C e umidade relativa do ar quase sempre sendo superior a 90% (Rodríguez-Durán, 1998), tendendo à saturação. Estas elevadas temperaturas são resultado do calor gerado pela presença de milhares de indivíduos e pela decomposição do guano por eles depositado (Peck et al., 1998). Embora excepcionais, *bat caves* são muito pouco conhecidas sob o ponto de vista científico (Ladle et al., 2012; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022; Piló et al., no prelo).

No Brasil, *bat caves* são conhecidas no Nordeste e na região amazônica (Rocha, 2013; Vargas-Mena et al., 2018; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022, Piló et al., no prelo). Nesta última, a região de Carajás, no Pará, abriga ao menos seis *bat caves* (ICMBIO, 2017). De fato, no Plano de Pesquisa da Floresta Nacional (FLONA) de Carajás, as *bat caves* são destacadas como prioritárias para investigação. Na FLONA de Carajás já foram identificadas oito famílias, 46 gêneros e 75 espécies de morcegos, sendo que

lower thermoregulation costs, as well as protection against climatic variations and predators. Because of these factors, certain bat species tend to form large colonies in cave environments (Altringham, 1996) and/or live in cohabitation with other species (Kunz, 1982; Trajano, 1985, 1995).

Bats hold the record for the largest congregations among mammals, reaching situations where millions of individuals converge on a single shelter. Shelters with exceptional bat populations are called bat caves and/or hot caves (e.g. Ladle et al., 2012). These places are very peculiar shelters, with temperatures often exceeding 35°C and relative humidity almost always exceeding 90% (Rodríguez-Durán, 1998), tending towards saturation. These high temperatures are the result of the heat generated by the presence of thousands of individuals and the decomposition of the guano they deposit (Peck et al., 1998). Although exceptional, bat caves are very little known from a scientific point of view (Ladle et al., 2012; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022; Piló et al., in press).

In Brazil, bat caves are known in the Northeast and in the Amazon region (Rocha, 2013; Vargas-Mena et al., 2018; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022, Piló et al., in press). In the latter, the Carajás region, in Pará, is home to at least six bat caves (ICMBIO, 2017). In fact, in the Research Plan for the Carajás National Forest (Floresta Nacional de Carajás), bat caves are highlighted as a priority for investigation. Eight families, 46 genera and 75 species of bats have already been identified in the Carajás National Forest, 23 of which inhabit caves (Tavares et al., 2012). The caves in the Carajás complex contain characteristics that indicate their high relevance and therefore need to be monitored differently in relation to the use and pressures they experience.

23 dessas espécies habitavam cavernas (Tavares *et al.*, 2012). As cavernas do complexo de Carajás contêm características que apontam elevada relevância e, portanto, precisam de um acompanhamento diferenciado em relação ao uso e pressões que experimentam.

Pesquisas em *bat caves* do semiárido do Brasil apontam que estes abrigos podem ser extremamente dinâmicos e suas populações de morcegos podem variar muito ao longo do tempo (Otálora-Ardila *et al.* 2019; Pimentel *et al.*, 2022). O dinamismo observado aponta que mesmo visitas mensais padronizadas podem ser insuficientes para detectarem grandes flutuações populacionais, e a maior parte da rica informação sobre estes abrigos é perdida sem um acompanhamento refinado destes ambientes. *Bat caves* exigem assim um monitoramento contínuo e detalhado, pois só desta forma estas nuances e suas peculiaridades podem ser detectadas e contextualizadas. Entretanto, monitorar estes ambientes de forma detalhada e contínua pode ser desafiador, dadas as localizações e condições destes ambientes. Neste sentido, o monitoramento da temperatura destas cavernas tem sido apontado como um *proxy* de como os morcegos estão usando *bat caves* (Otálora-Ardila *et al.*, 2019). Mas, tão importante como entender as flutuações populacionais, é também entender, como as grandes colônias de morcegos podem alterar as características térmicas desses abrigos e se há uma espacialização distinta dessas grandes colônias no interior dessas *bat caves*. Estes aspectos permanecem pouco conhecidos para as *bat caves*, de maneira geral. Elucidá-los pode ser útil para contribuir com várias abordagens, desde o entendimento da ecologia básica das espécies que usam estes abrigos, até para o

Research on bat caves in the semi-arid region of Brazil shows that these shelters can be extremely dynamic and their bat populations can vary greatly over time (Otálora-Ardila et al. 2019; Pimentel et al., 2022). The dynamism observed points out that even standardized monthly visits may be insufficient to detect large population fluctuations, and most of the rich information about these shelters is lost without refined monitoring of these environments. Bat caves therefore require continuous and detailed monitoring, because only in this way can these nuances and their peculiarities be detected and contextualized. However, monitoring in a detailed and continuous manner can be challenging, given the locations and conditions of these environments. In this sense, monitoring the temperature of these caves has been pointed out as a proxy for how bats are using bat caves (Otálora-Ardila et al., 2019). As important as understanding population fluctuations, it is also important to understand how large bat colonies can alter the thermal characteristics of these shelters and whether there is a distinct spatialization of these large colonies within these bat caves. These aspects remain little known for bat caves in general. Elucidating them can be useful in contributing to various approaches, from understanding the basic ecology of species that use these shelters, to developing specific conservation strategies for these cave environments (Brasil, 2017).

In order to contribute to a better understanding of the dynamics of bat caves, as well as estimates of the populations of bats living in these caves and their richness, the results of detailed thermal monitoring of two bat caves in the Carajás National Forest are presented here. In addition to providing basic information essential for characterizing these bat caves, the results allowed to 1) describe the daily patterns of bats leaving and

desenvolvimento de estratégias específicas de conservação destes ambientes cavernícolas (Brasil, 2017).

De forma a contribuir para o melhor entendimento da dinâmica das *bat caves*, além das estimativas das populações de morcegos residentes nestas cavernas e sua riqueza, apresentamos aqui os resultados de um monitoramento térmico detalhado de duas *bat caves* na FLONA de Carajás. Além da produção de informações básicas essenciais para a caracterização destas *bat caves*, os nossos resultados permitiram 1) descrever os padrões diários de saída e retorno dos morcegos nestes abrigos, 2) identificar possíveis padrões sazonais na flutuação da população residente de morcegos dessas cavernas; e 3) identificar características físicas e termais preferidas pelos morcegos. Nesse sentido e assumindo que as grandes colônias de morcegos de fato podem alterar a temperatura de uma caverna, as seguintes hipóteses foram levantadas: 1) Esperava-se que a temperatura da caverna fosse diferente em áreas distintas e correspondente à abundância de morcegos. Assim, áreas com elevada abundância, teriam temperaturas maiores que áreas com baixa abundância ou até mesmo, ausência de morcegos; 2) A movimentação de morcegos dentro da caverna, também iria alterar de forma pontual a temperatura e isso poderia nos indicar períodos de saída e retorno dos morcegos para os abrigos, ou seja, presença e ausência desses indivíduos nas *bat caves*.

returning to these shelters, 2) identify possible seasonal patterns in the fluctuation of the resident bat population in these caves; and 3) identify physical and thermal characteristics preferred by the bats. In this sense, and assuming that large bat colonies can indeed alter the temperature of a cave, the following hypotheses were raised: 1) It was expected that the temperature of the cave would be different in different areas corresponding to the abundance of bats. Thus, areas with a high abundance of bats would have higher temperatures than areas with a low abundance or even an absence of bats; 2) The bats movement within the cave would also alter the temperature in a specific way and this could indicate periods when bats leave and return to the shelters, i.e. the presence and absence of these individuals in the bat caves.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Serra dos Carajás, no sudeste do Pará, a 550 km ao sul da capital Belém, está quase toda inserida na Floresta Nacional de Carajás (Figura 1, que junto a outras áreas protegidas compõe o chamado “Mosaico Carajás”, com cerca de 1.207.000 hectares. São conhecidas localmente como Serra Norte e Serra Sul, dois grandes conjuntos onde estão localizadas as principais jazidas de minério de ferro no interior da FLONA de Carajás (Mota *et al.*, 2018).

MATERIALS AND METHODS

Study Area

The Carajás Ridge (Serra dos Carajás), in southeastern Pará, located 550 km south of the capital Belém, is almost entirely part of the Carajás National Forest (Figure 1), which together with other protected areas makes up the so-called “Carajás Mosaic”, covering around 1,207,000 hectares. They are known locally as Serra Norte and Serra Sul, two large areas where the main iron ore deposits are located within the Carajás National Forest (Mota *et al.*, 2018).

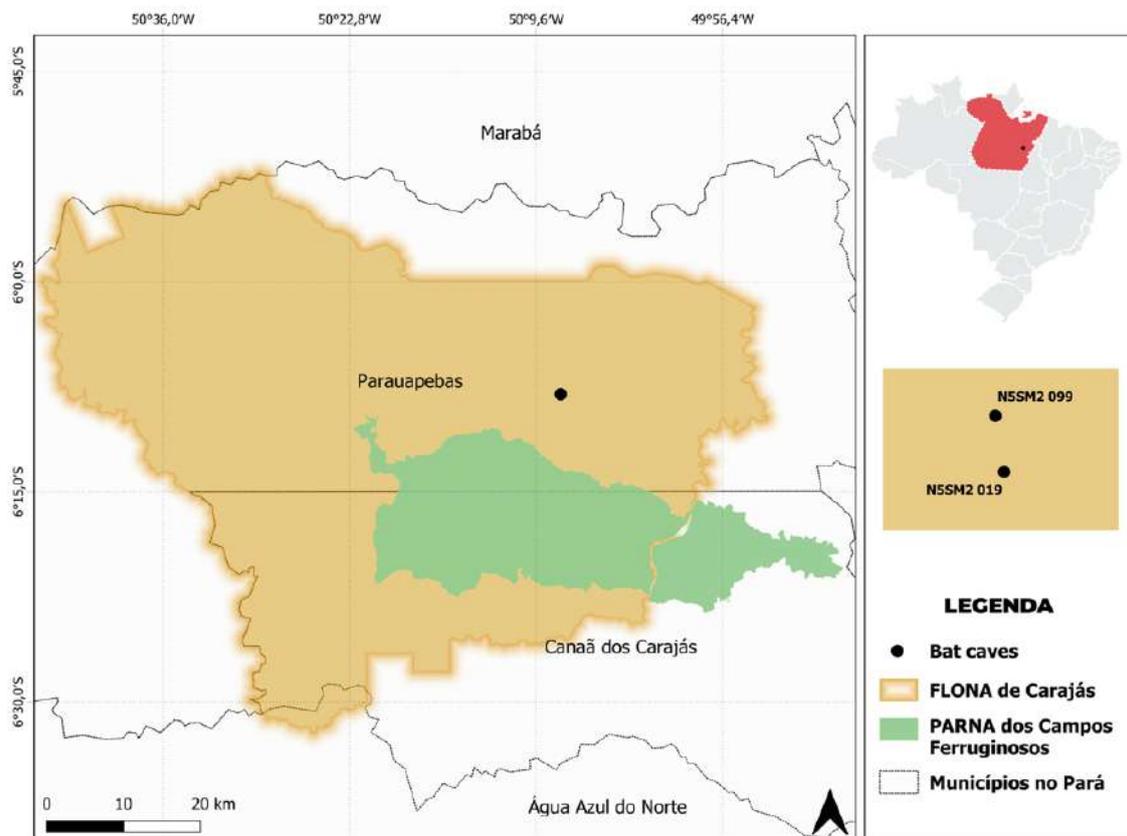


Figura 1 – Mapa de localização das *bat caves* monitoradas, no município de Parauapebas, Pará, Brasil.

Figure 1 – Location map of the *bat caves* monitored in the municipality of Parauapebas, Pará, Brazil.

A região de Carajás detém o maior número de cavidades naturais subterrâneas ferruginosas conhecidas no Brasil. São 1.630 cavidades registradas até o momento, correspondentes a aproximadamente 10% do registro nacional de cavidades (CANIE, 2022) e centenas ainda por inventariar em litologia ferrífera com biospeleogênese, minerais e espeleotemas únicos (Piló *et al.*, no prelo). É nesse cenário que estão inseridas as *bat caves* N5SM2 019 (06°08'10.1"S; 50°07'47.7"W; registro CECAV 007401.01100.15.05536) e N5SM2 099 (06°08'09.2"S , 50°07'47.8"W; registro CECAV 007313.01012.15.05536) (Figura 1).

Segundo Álvares *et al.* (2014), o clima da região é Am, apresentando um clima tropical quente e úmido, com precipitação média anual de ca. 1600 mm, apresentando uma estação chuvosa que pode chegar até a 1300 mm, e um inverno seco com média menor de 320 mm, com a média nos meses mais secos às vezes atingindo menos de 60 mm (Moraes *et al.*, 2005).

Estimativa da abundância de morcegos nas *bat caves*

Para estimar a abundância dos morcegos em cada *bat cave*, foram contados os indivíduos emergindo dos abrigos para forrageio, utilizando uma técnica não invasiva baseada em imagens geradas por uma câmera térmica infravermelho (FLIR, modelo E60). A câmera foi instalada na entrada da caverna e as gravações tiveram início às 18h, com vídeos com duração de 60 a 180 minutos, até que não houvesse mais detecção de morcegos emergindo do abrigo. Os morcegos registrados nas imagens foram contados automaticamente usando um algoritmo de detecção especificamente desen-

*The Carajás region has the largest number of known ferruginous underground natural caves in Brazil. There are 1,630 caves registered to date, corresponding to approximately 10% of the national cave register (CANIE, 2022) and hundreds still to be inventoried in ferriferous lithology with unique biospeleogenesis, minerals and speleothems (Piló *et al.*, in press). It is in this scenario that bat caves N5SM2 019 (06°08'10.1"S; 50°07'47.7"W; CECAV record 007401.01100.15.05536) and N5SM2 099 (06°08'09.2"S , 50°07'47.8"W; CECAV record 007313.01012.15.05536) are located (Figure 1).*

*According to Álvares *et al.* (2014), the region's climate is Am, with a hot and humid tropical climate, with an average annual rainfall of 1600 mm. The rainy season can reach up to 1300 mm, and the dry winter has an average of less than 320 mm, with the driest months sometimes reaching less than 60 mm (Moraes *et al.*, 2005).*

Bat abundance estimation in bat caves

*To estimate bat abundance in each bat cave, individuals emerging from the shelters were counted using a non-invasive technique based on images generated by an infrared thermal camera (FLIR, model E60). The camera was installed at the entrance of the cave and recordings began at 6pm, with videos lasting between 60 and 180 minutes, until no more bats were detected emerging from the shelter. The bats recorded in the images were automatically counted using a detection algorithm specifically developed to track and count bats (Rodrigues *et al.*, 2016). Validations of the algorithm in the laboratory indicated < 6%,*

volvido para rastrear e contar morcegos (Rodrigues *et al.*, 2016). Validações do algoritmo em laboratório indicaram margens de erro < 6%, com uma média de erro de aproximadamente 3% (Otálora-Ardila *et al.*, 2019). Três contagens durante esse projeto, em ambas as cavernas foram realizadas nas seguintes datas: 07 de julho de 2021, 01 de abril de 2022 e 30 de junho de 2022, para a *bat cave* N5SM2 019 e 06 de julho de 2021, 02 de abril de 2022 e 01 de julho de 2023 para a *bat cave* N5SM2 099. Contagens realizadas em 04 e 05 de abril de 2019 por L. B. Piló (no prelo) também foram incorporados, pois elas agregam informações para as mesmas *bat caves* e com os mesmos objetivos desse projeto. Os dados de L. B. Piló (no prelo) foram coletados para outro projeto, intitulado: *Bat caves em cavernas ferríferas da Floresta Nacional de Carajás: aspectos físicos, biológicos e cronológicos*, no qual as duas cavernas desse projeto estavam inseridas, porém, sem relação direta com esse projeto.

Riqueza de espécies das *bat caves*

Para verificar a riqueza de espécies foram realizadas incursões nas cavernas para observação e captura de indivíduos *in situ*, além de captura de indivíduos deixando os abrigos para forrageio no crepúsculo, com redes-de-mão. Os morcegos foram medidos e identificados até o nível específico possível, baseado em chaves de identificação de caracteres externos (Díaz *et al.*, 2016), sendo soltos em seguida. Os morcegos foram capturados e manuseados em campo de acordo com as diretrizes aprovadas pela *American Society of Mammalogists* (Sikes *et al.*, 2019) e com a permissão número 76657-2 (SISBio/ICMBio/MMA). Exemplares-testemunho

margins of error, with an average of approximately 3% (Otálora-Ardila et al., 2019). Three counts were carried out in both caves during this project on the following dates: July 7, 2021, April 1, 2022 and June 30, 2022, for bat cave N5SM2 019 and July 6, 2021, April 2, 2022 and July 1, 2023 for bat cave N5SM2 099. Counts carried out on April 4 and 5, 2019 by L. B. Piló (in press) have also been incorporated, as they add information for the same bat caves and with the same objectives as this project. The data from L. B. Piló (in press) was collected for another project, entitled: Bat caves in ferriferous caves of the Carajás National Forest: physical, biological and chronological aspects, in which the two caves of this project were inserted, but without direct relation to this project.

Species richness of *bat caves*

In order to verify species richness, incursions were made into the caves to observe and capture individuals in situ, as well as capturing individuals leaving the shelters to forage at dusk, using hand nets. The bats were measured and identified to the specific level possible, based on external character identification keys (Díaz et al., 2016), and then released. The bats were captured and handled in accordance with the guidelines approved by the American Society of Mammalogists (Sikes et al., 2019) and with permit number 76657-2 (SISBio/ICMBio/MMA). Witness specimens were collected, following all procedures and current license, and sent to the Mammal Collection of the Federal

foram coletados, seguindo todos os procedimentos e licença vigente, e encaminhados para a Coleção de Mamíferos da Universidade Federal de Pernambuco, em Recife. Gravações bioacústicas, utilizando um gravador de ultrassom *Audiomoth* v1.1.0, também foram utilizadas para refinamento dos dados da riqueza dessas cavernas.

Monitoramento da temperatura das *bat caves*

O monitoramento contínuo das *bat caves* N5SM2 019 e N5SM2 099 teve duração de 12 meses, iniciando-se em julho de 2021. Para essa sessão, também foram incorporados os dados coletados entre abril e setembro de 2019 por L. B. Piló (no prelo), pois também agregam informações para as mesmas *bat caves*. A coleta de dados da temperatura foi realizada com *data loggers* modelos HOBO MX2201 e MX2203, com registros em intervalos de 10 minutos. Cinco *data loggers* foram instalados em cada caverna em 06 de julho de 2021, após a emergência dos morcegos no início da noite e permaneceram gravando até 28 de junho de 2022. Os *data loggers* foram identificados no mapa das cavidades: TRH 01, TRH 02, TRH 03, TRH 04 e TRH 05 (ver Figura 4). A conexão e *download* dos dados destes *data loggers* foram realizadas através de um smartphone, via *bluetooth* e através do *software* HOBOMobile (<https://sigmasensors.com.br/produtos/software-de-analise-de-dados-hoboware>) instalado no aparelho, foram feitas a exportação dos arquivos em formato .csv. As condições nas cavernas se mostraram adversas e alguns *data loggers* apresentaram problemas de funcionamento com interrupção de registro de dados. Os *data loggers* TRH 04 e TRH 05 de N5SM2 019 tiveram seus registros interrompidos em abril de 2022 e março de

University of Pernambuco, in Recife. Bioacoustic recordings, using an Audiomoth v1.1.0 ultrasound recorder, were also used to refine the data on these caves richness.

Bat caves temperature monitoring

The continuous monitoring of bat caves N5SM2 019 and N5SM2 099 started in July 2021 and lasted 12 months. For this session, the data collected between April and September 2019 by L. B. Piló (in press) was also incorporated, as it adds information for the same bat caves. Temperature data was collected using HOBO MX2201 and MX2203 data loggers, recording at 10-minute intervals. Five data loggers were installed in each cave after the bats emerged in the early evening on July 6, 2021, and remained recording until June 28, 2022. The data loggers were identified on the cave map: TRH 01, TRH 02, TRH 03, TRH 04 and TRH 05 (see Figure 4). The data from these data loggers was connected and downloaded using a smartphone via Bluetooth and the HOBOMobile software (<https://sigma-sensors.com.br/produtos/software-de-analise-de-dados-hoboware>) installed on the device was used to export the files in .csv format. The conditions in the caves proved adverse and some of the data loggers malfunctioned, interrupting data recording. The TRH 04 and TRH 05 data loggers in N5SM2 019 had their records interrupted in April 2022 and March 2022, respectively. The latter was replaced by data logger TRH 02. For N5SM2 099, the TRH 01, TRH 02 and TRH 03 data loggers, all installed in the area accessed by entrance 1, had their records interrupted in

2022, respectivamente. Esse último foi substituído pelo *data logger* TRH 02. Para N5SM2 099, os *data loggers* TRH 01, TRH 02 e TRH 03, todos instalados na área acessada pela entrada 1, tiveram seus registros interrompidos em abril de 2022, e dezembro e outubro de 2021, respectivamente. Para gerar os gráficos, foram utilizados o *software* HOBO (<https://sigmasensors.com.br/produtos/software-de-analise-de-dados-hoboware>) e o pacote Microsoft Excel (2016).

RESULTADOS

Abundância e riqueza de espécies de morcegos

A abundância em N5SM2 099 variou de 53.013 (julho de 2022) a 88.464 morcegos (abril de 2022), e em N5SM2 019 de 10.995 (abril de 2019) a 16.199 morcegos (julho de 2022 – Figura 2).

April 2022, December and October 2021, respectively. The HOBO software (<https://sigmasensors.com.br/produtos/software-de-analise-de-dados-hoboware>) and the Microsoft Excel package (2016) were used to generate the graphs.

RESULTS

Abundance and bat species richness

The abundance in N5SM2 099 ranged from 53,013 (July 2022) to 88,464 bats (April 2022), and in N5SM2 019 from 10,995 (April 2019) to 16,199 bats (July 2022 - Figure 2).

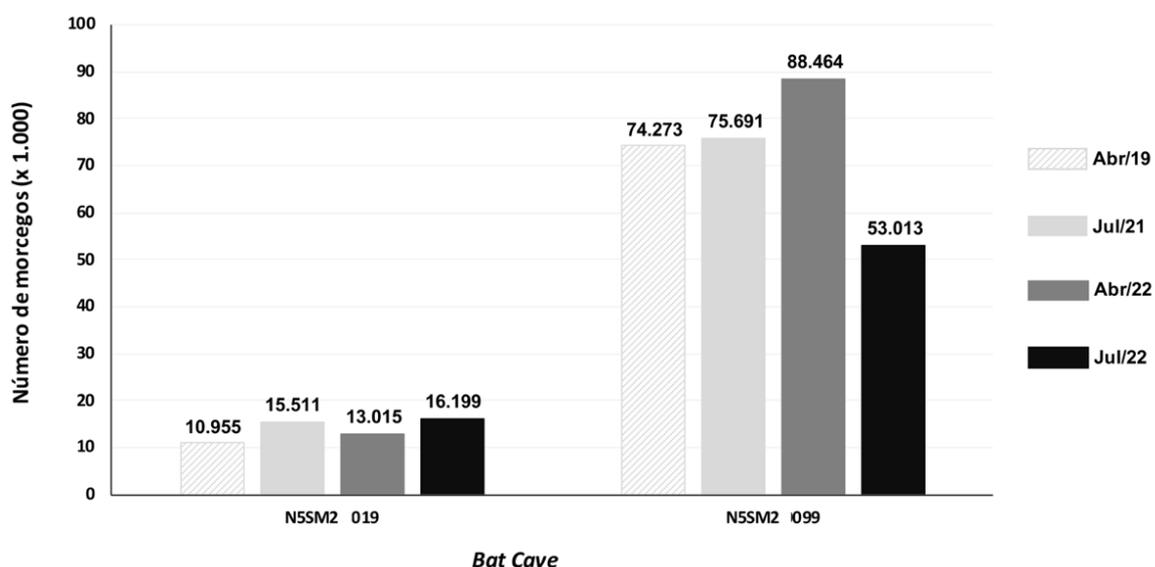


Figura 2 – Abundância de morcegos nas *bat caves* N5SM2 019 e N5SM2 099. As contagens para abril de 2019 referem-se aos dados incorporados de L. B. Piló (no prelo).

Figure 2 – Abundance of bats in bat caves N5SM2 019 and N5SM2 099. The counts for April 2019 refer to the data incorporated from L. B. Piló (in press).

Foram registradas nove espécies utilizando as cavernas amostradas, cinco pertencentes a família Phyllostomidae (*Carollia perspicillata*, *Glossophaga soricina*, *Lampronnycteris brachyotis*, *Phyllostomus hastatus* e *Trachops cirrhosus*) e quatro da família Mormoopidae (*Pteronotus gymnonotus*, *P. personatus*, *P. rubiginosus* e *P. alitonus*) (Figura 3). As espécies estão agrupadas em cinco guildas: insetívora, frugívora, nectarívora-polinívora, onívora e carnívora. Espécimes-testemunho foram coletados para as espécies de *Carollia perspicillata*, *Lampronnycteris brachyotis*, *Pteronotus gymnonotus*, *Pteronotus personatus* e *Pteronotus rubiginosus*/*P. alitonus*.

Nine species were recorded using the sampled caves, five belonging to the Phyllostomidae family (*Carollia perspicillata*, *Glossophaga soricina*, *Lampronnycteris brachyotis*, *Phyllostomus hastatus* and *Trachops cirrhosus*) and four from the Mormoopidae family (*Pteronotus gymnonotus*, *P. personatus*, *P. rubiginosus* and *P. alitonus*) (Figure 3). The species are grouped into five guilds: insectivore, frugivore, nectarivore-pollinivore, omnivore and carnivore. Voucher specimens were collected for the species *Carollia perspicillata*, *Lampronnycteris brachyotis*, *Pteronotus gymnonotus*, *Pteronotus personatus* and *Pteronotus rubiginosus*/*P. alitonus*.

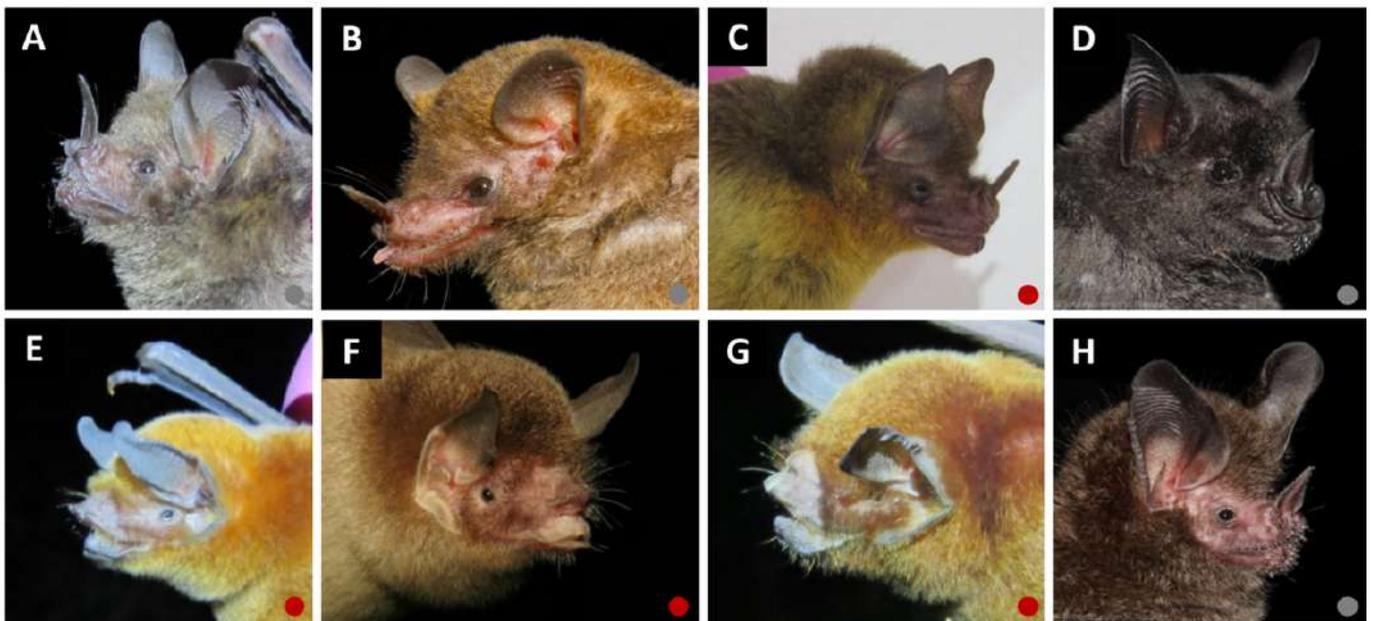


Figura 3 – Espécies registradas e capturadas em ambas as bat caves, na FLONA de Carajás, Pará, durante o monitoramento desse projeto. A – *Carollia perspicillata* (N5SM2 099); B – *Glossophaga soricina* (N5SM2 099); C – *Lampronnycteris brachyotis* (N5SM2 099); D – *Phyllostomus hastatus* (N5SM2 099); E – *Pteronotus gymnonotus* (N5SM2 019 e N5SM2 099); F – *Pteronotus personatus* (N5SM2 019 e N5SM2 099); G – *Pteronotus rubiginosus*/*P. alitonus** (N5SM2 019 e N5SM2 099); H – *Trachops cirrhosus* (N5SM2 099). *Espécies indistinguíveis visualmente (registro de ambas através da acústica). Círculo vermelho indica espécies estritamente cavernícolas e círculo cinza indica espécies cavernícolas oportunistas.

Figure 3 – Species recorded and captured in both bat caves, at Carajás National Forest, Pará, during the monitoring of this project. A – *Carollia perspicillata* (N5SM2 099); B – *Glossophaga soricina* (N5SM2 099); C – *Lampronnycteris brachyotis* (N5SM2 099); D – *Phyllostomus hastatus* (N5SM2 099); E – *Pteronotus gymnonotus* (N5SM2 019 and N5SM2 099); F – *Pteronotus personatus* (N5SM2 019 and N5SM2 099); G – *Pteronotus rubiginosus*/*P. alitonus** (N5SM2 019 and N5SM2 099); H – *Trachops cirrhosus* (N5SM2 099). * Visually indistinguishable species (both recorded acoustically).

Saída e retorno diário dos morcegos e alterações na temperatura das cavernas

O conjunto de filmagens indicou que o horário de saída dos morcegos se inicia por volta das 18h15 e adotamos este como o horário “padrão” de emergência. Para verificar o comportamento da temperatura das cavernas a partir da movimentação de saída dos morcegos, um período de sete dias consecutivos (01 a 07) no mês de agosto de 2021 foi analisado em maior detalhe. Neste período, para N5SM2 019 é possível observar que a temperatura dos “loggers” localizados na porção mais distante da entrada da caverna (TRH 03, TRH 04 e TRH 05) cai após a saída dos morcegos, em quase 1°C (Figura 4A). Um aumento da temperatura destes “loggers” é observado novamente próximo às 06h da manhã seguinte, período quando os morcegos já haviam retornado ao abrigo. Esse aumento na temperatura variou de 0,5°C a 1,0°C. Como não foi possível permanecer na caverna para registrar o retorno dos morcegos, assumimos às 5h30, como horário de retorno, uma vez que houve registro de aumento da temperatura próximo às 6h. Padrão similar é observado nos “loggers” de N5SM2 099 (Figura 4B). Essas alterações confirmam que as temperaturas das cavernas experimentam variações circadianas associadas à movimentação diária de saída dos morcegos para forrageio no final do entardecer, e retorno no final da madrugada.

Bats daily departure and return and changes in cave temperature

All the footage showed that the bats leave at around 6:15 p.m. and it was adopted as the “standard” emergence time. In order to verify the temperature behavior in the caves based on the bats’ exit movements, a period of seven consecutive days (01 to 07) in the month of August 2021 were analyzed in greater detail. During this period, for N5SM2 019 it can be seen that the temperature of the loggers located furthest from the cave entrance (TRH 03, TRH 04 and TRH 05) drops by almost 1°C after the bats leave (Figure 4A). An increase in the temperature of these loggers is observed again around 06:00 the following morning, when the bats have already returned to the shelter. This increase in temperature ranged from 0.5°C to 1.0°C. As it wasn’t possible to stay in the cave to record the bats’ return, 05:30 was assumed as the time of return, since there was a record of a rise in temperature close to 06:00. A similar pattern was observed in the loggers of N5SM2 099 (Figure 4B). These changes confirm that cave temperatures experience variations associated with the daily movement of bats leaving to forage in the late evening and returning in the early morning.

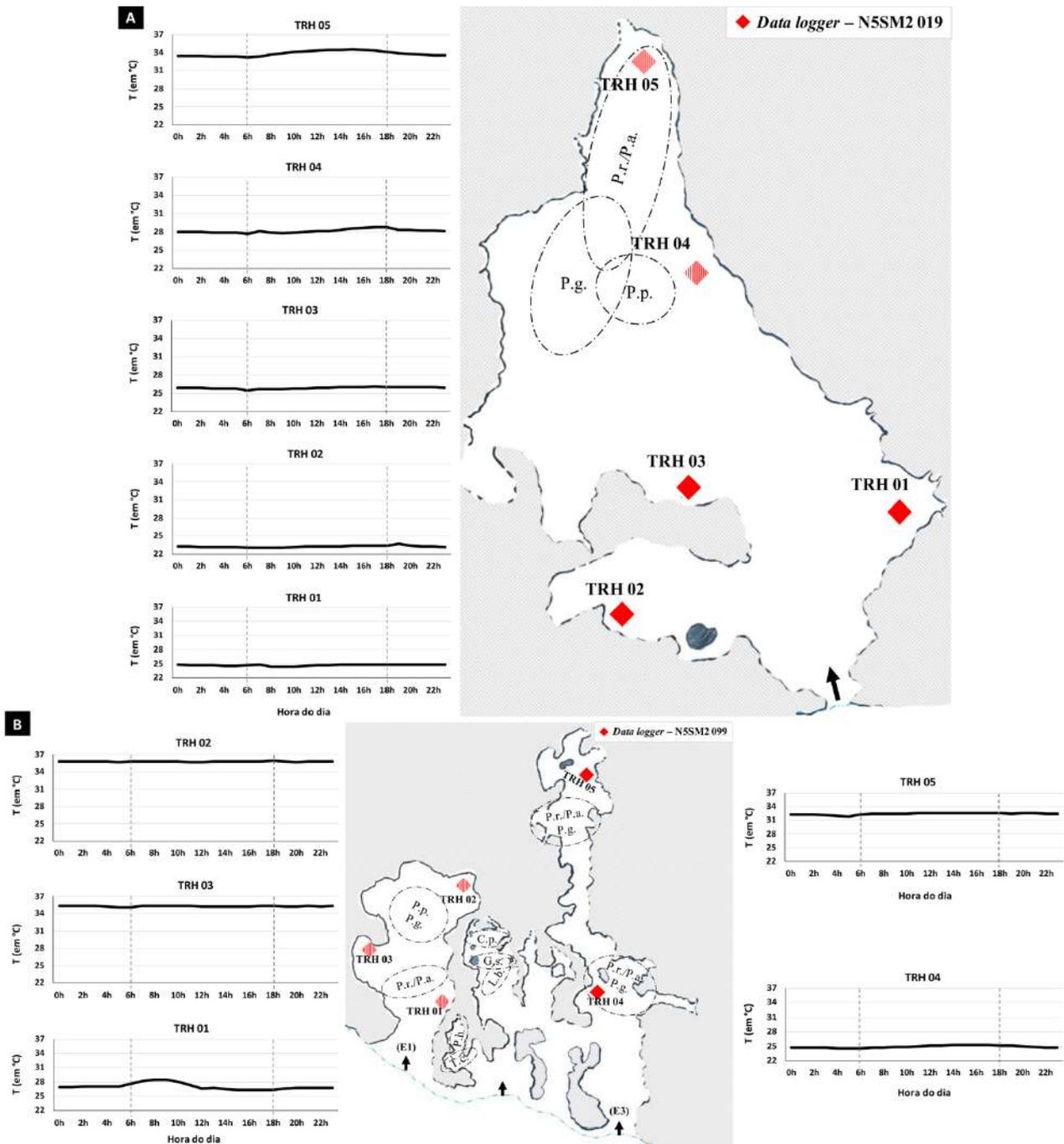


Figura 4 – Esboço das cavernas N5SM2 019 (A – à direita) e N5SM2 099 (B - centro), com indicação do posicionamento dos data loggers de temperatura. A seta indica a(s) entrada(s) da caverna. Os gráficos indicam o registro da média diária da temperatura no período de 01 a 07 de agosto de 2021. A linha tracejada indica o horário de saída e possível retorno dos morcegos ao abrigo. Em (B), à esquerda, registro da média diária da temperatura no período de 01 a 07 de agosto de 2021, para a área acessada pela entrada E1 e à direita, registro da média diária da temperatura no mesmo período, para a área acessada pela entrada E3. A linha tracejada indica a localização das colônias de morcegos presentes nas cavidades: C.p. = *Carollia perspicillata*; G.s. = *Glossophaga soricina*; L.b. = *Lamproncyteris brachyotis*; P.h. = *Phyllostomus hastatus*; P.g. = *Pteronotus gymnonotus*; P.p. = *P. personatus*; P.r./P.a. = *P. rubiginosus/P. alitonus*; T.c. = *Trachops cirrhosus*.

Figure 4 – Sketch of caves N5SM2 019 (A - right) and N5SM2 099 (B - center), indicating the position of the temperature data loggers. The arrow indicates the cave entrance(s). The graphs show the average daily temperature record for the period from August 1 to 7, 2021. The dashed line indicates the time the bats left and possibly returned to the shelter. In (B), on the left, a record of the average daily temperature for the period from August 1 to 7, 2021, for the area accessed by entrance E1 and on the right, a record of the average daily temperature for the same period, for the area accessed by entrance E3. The dashed line indicates the location of the bat colonies present in the cavities: C.p. = *Carollia perspicillata*; G.s. = *Glossophaga soricina*; L.b. = *Lamproncyteris brachyotis*; P.h. = *Phyllostomus hastatus*; P.g. = *Pteronotus gymnonotus*; P.p. = *P. personatus*; P.r./P.a. = *P. rubiginosus/P. alitonus*; T.c. = *Trachops cirrhosus*.

Uma vez constatada que a temperatura da caverna responde à presença/ausência dos morcegos, foi possível utilizar esta variável para inferir outras informações sobre a presença e localização da colônia. A análise da temperatura no mesmo período também aponta diferenças internas dentro das cavernas: as câmaras com temperaturas mais baixas estão próximas à entrada da caverna, e as mais altas na parte final da caverna (ver Figura 6). Em N5SM2 019, quando da saída dos morcegos, por volta das 18h15, as temperaturas das câmaras mais internas e mais quentes diminuíram em quase 1°C, enquanto as temperaturas das câmaras mais próximas às entradas aumentam, possivelmente indicando que antes dos morcegos saírem para forragear eles se concentram nas áreas próximas à entrada e, a partir daí, começam o movimento de saída do abrigo. Por outro lado, quando retornaram ao abrigo há um aumento de temperatura em todas as áreas da caverna (variando de 0,5°C a 1°C), porém maior junto ao *data logger* TRH 05, indicando que esta é a câmara com a maior densidade de indivíduos. Já N5SM2 099 apresenta entradas diferentes e que não se conectam diretamente e se comportam como ambientes distintos, com distintas temperaturas (Figura 4). Nesta caverna, também houve temperaturas mais baixas próximo às entradas e temperaturas mais altas nas áreas mais internas da caverna. Porém, a área da entrada 1 é mais quente que a da entrada 3. Na área acessada pela entrada 1 detectamos uma diminuição abrupta da temperatura nos *data loggers* TRH 02 e TRH 03 em quase 0,5°C, após a saída dos morcegos dos abrigos, e um ligeiro aumento na temperatura da área onde se encontrava o “*logger*” TRH 01. O mesmo comportamento se repetiu nas temperaturas registradas na área acessada pela entrada 3.

Once it was established that the temperature of the cave responds to the presence/absence of bats, it was possible to use this variable to infer other information about the presence and location of the colony. Temperature analysis over the same period also points to internal differences within the caves: the chambers with the lowest temperatures are near the cave entrance, and the highest at the end of the cave (see Figure 6). In N5SM2 019, when the bats left at around 6:15 pm, the temperatures of the innermost and warmest chambers dropped by almost 1°C, while the temperatures of the chambers closest to the entrances increased, possibly indicating that before the bats left to forage, they concentrated in the areas close to the entrance and then began to leave the shelter. On the other hand, when they return to the shelter, there is an increase in temperature in all areas of the cave (ranging from 0.5°C to 1°C), but this is greatest near data logger TRH 05, indicating that this is the chamber with the highest density of individuals. N5SM2 099, however, has different entrances which are not directly connected and behave as separate environments with different temperatures (Figure 4). In this cave, there were also lower temperatures near the entrances and higher temperatures in the inner areas of the cave. However, the area at entrance 1 is warmer than that at entrance 3. In the area accessed by entrance 1, an abrupt decrease in temperature in the TRH 02 and TRH 03 data loggers of almost 0.5°C was detected after the bats left the shelters, and a slight increase in temperature in the area where the TRH 01 logger was located. The same behavior was repeated in the temperatures recorded in the area accessed by entrance 3.

Diferenças de temperatura intra e inter-cavernas

Comparamos as temperaturas entre e dentro as cavernas. Para essa análise, extraímos a média diária da temperatura para ambas, e analisamos as temperaturas mensalmente. De maneira geral, os dados de temperatura foram diferentes para as cavernas. N5SM2 019 apresentou registros de temperatura máxima de 36,89°C, mínima de 22,78°C, média de 27,53°C, com amplitude de 14,11°C (Figura 5A). Para a porção 1 de N5SM2 099 (“loggers” TH01, TH02 e TH03), a temperatura máxima foi de 39,77°C, a mínima de 25,52°C, média de 34,12°C, e amplitude de 14,25°C (Figura 5B). Para a porção 3 (“loggers” TH04 e TH05), a máxima registrada foi de 36,82°C, mínima de 23,77°C, média de 29,52°C e amplitude de 13,05°C (Figura 5B). Quando todos os “loggers” de N5SM2 099 são considerados juntos, esta teve temperatura média de 32,28°C e amplitude de 16,00°C, indicando que esta caverna é mais quente e experimenta maior variação na temperatura em comparação com N5SM2 019 (Figura 5).

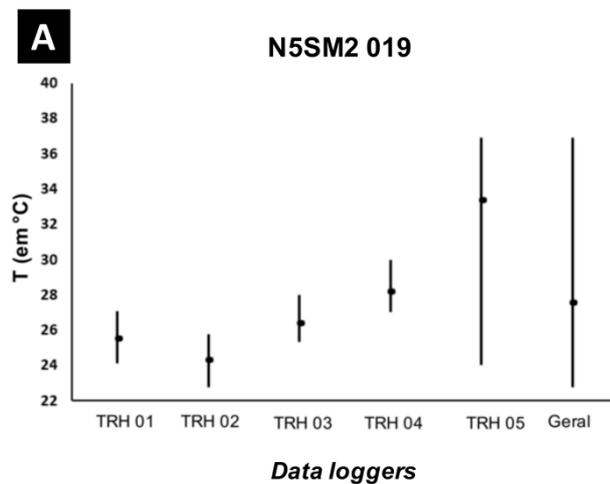


Figura 5 – Temperaturas mínimas, médias e máximas registradas por diferentes data loggers (TH1 a TH5) nas cavernas N5SM2 019 (A) e N5SM2 099 (B), na região de Carajás, Pará, Brasil, entre julho de 2021 e junho de 2022.

Temperature differences within and between caves

The temperatures between and within the caves were compared. For this analysis, the average daily temperature for both was extracted, and analyzed on a monthly basis. In general, the temperature data was different for the caves. N5SM2 019 recorded a maximum temperature of 36.89°C, a minimum of 22.78°C and an average of 27.53°C, with an amplitude of 14.11°C (Figure 5A). For portion 1 of N5SM2 099 (loggers TH01, TH02 and TH03), the maximum temperature was 39.77°C, the minimum was 25.52°C, the average was 34.12°C and the amplitude was 14.25°C (Figure 5B). For portion 3 (loggers TH04 and TH05), the maximum temperature was 36.82°C, the minimum 23.77°C, the average 29.52°C and the amplitude 13.05°C (Figure 5B). When all the loggers in N5SM2 099 are considered together, it had an average temperature of 32.28°C and an amplitude of 16.00°C, indicating that this cave is warmer and experiences greater variation in temperature compared to N5SM2 019 (Figure 5).

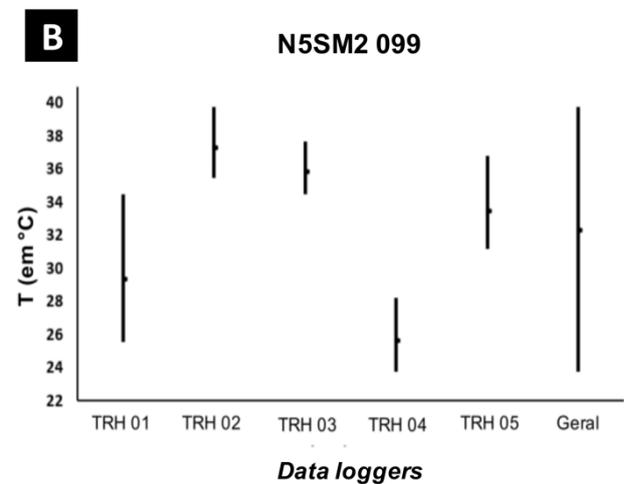


Figure 5 – Minimum, average and maximum temperatures recorded by different data loggers (TH1 to TH5) in caves N5SM2 019 (A) and N5SM2 099 (B), in the Carajás region, Pará, Brazil, between July 2021 and June 2022.

A análise de cada "logger" de cada caverna individualmente entre julho de 2021 e junho de 2022 aponta também diferenças significativas entre as temperaturas das diferentes câmaras de uma mesma caverna. Em N5SM2 019, o data logger TRH 02 registrou a menor média de temperatura (24,3°C; intervalo 22,78°C a 25,74°C), com temperatura variando 0,98°C, em julho/2021, e 1,89°C em janeiro/2022. O "logger" TRH 05 teve a maior média (33,33°C, intervalo 24,02°C a 36,89°C), variando 0,90°C, em maio/2022, e 2,66°C, em novembro/2021. Em N5SM2 099, o "logger" TRH 04 teve a menor média (25,62°C, intervalo 23,77°C a 28,20°C), variando 1,21°C, em junho/2022, e 2,59°C, em janeiro/2022. Nesta caverna, a maior média foi registrada pelo "logger" TRH 02 (37,24°C, intervalo de 35,48°C a 39,77°C), variando 0,68°C, em agosto/2021, e 1,85°C, em outubro/2021.

As diferenças nas temperaturas das câmaras podem ser melhor entendidas quando analisadas em conjunto com informação sobre a presença e composição de espécies nestes espaços. Ao contrário de N5SM2 019, onde quatro espécies de *Pteronotus* coabitavam o mesmo espaço (entre os "loggers" TRH 03 e TRH 05), com predominância de *P. rubiginosus*/*P. alitonus* (Figura 4), em N5SM2 099 havia uma segregação de espécies. Na área acessada pela entrada 1, havia *P. personatus* e *P. gymnonotus* ocupando as câmaras mais internas, com predominância de *P. personatus*, e *P. rubiginosus*/*P. alitonus* mais próximo da entrada, porém em menor abundância. Na área acessada pela entrada 3 havia *P. rubiginosus*/*P. alitonus* e *P. gymnonotus*, com predominância do primeiro em toda a sua extensão. Na área acessada pela entrada central – a menor área da caverna – concentraram-se as outras cinco

Analysis of each logger in each cave between July 2021 and June 2022 also shows significant differences between the temperatures of the different chambers in the same cave. In N5SM2 019, data logger TRH 02 recorded the lowest average temperature (24.3°C; range 22.78°C to 25.74°C), with temperatures varying from 0.98°C in July/2021 to 1.89°C in January/2022. The TRH 05 logger had the highest average (33.33°C, range 24.02°C to 36.89°C), varying by 0.90°C in May/2022 and 2.66°C in November/2021. In N5SM2 099, logger TRH 04 had the lowest average (25.62°C, range 23.77°C to 28.20°C), ranging from 1.21°C in June/2022 to 2.59°C in January/2022. In this cave, the highest average was recorded by logger TRH 02 (37.24°C, range 35.48°C to 39.77°C), ranging from 0.68°C in August/2021 to 1.85°C in October/2021.

*The differences in chamber temperatures can be better understood when analyzed together with information on the presence and composition of species in these spaces. Unlike N5SM2 019, where four *Pteronotus* species cohabited the same space (between loggers TRH 03 and TRH 05), with a predominance of *P. rubiginosus*/*P. alitonus* (Figure 4), in N5SM2 099 there was a segregation of species. In the area accessed by entrance 1, there were *P. personatus* and *P. gymnonotus* occupying the innermost chambers, with a predominance of *P. personatus*, and *P. rubiginosus*/*P. alitonus* closer to the entrance, but in less abundance. In the area accessed by entrance 3 there were *P. rubiginosus*/*P. alitonus* and *P. gymnonotus*, with the former predominating throughout. In the area accessed by the central entrance - the smallest area of the cave - the other five species that were observed using this cave were concentrated (*Carollia perspicillata*, *Glossophaga soricina*, *Lampronnycteris brachyotis*, *Phyllostomus hastatus* and *Trachops cirrhosus*), in much smaller colonies (Figure 4).*

espécies que foram observadas utilizando essa caverna (*Carollia perspicillata*, *Glossophaga soricina*, *Lamproncycteris brachyotis*, *Phyllostomus hastatus* e *Trachops cirrhosus*), em colônias bem menores (Figura 4). Para ambas as cavernas, temperaturas mais elevadas sempre estiveram associadas às porções com a presença de colônias mais numerosas. Nessas mesmas câmaras (câmaras mais internas de ambas as cavernas – N5SM2 019 e nas áreas 1 e 3, da caverna N5SM2 099), no mês de outubro de 2021 observamos colônias maternidade para todas as espécies do gênero *Pteronotus*. Portanto, é plausível afirmar que o aumento da temperatura entre setembro e janeiro coincide com o período reprodutivo de *Pteronotus*, e pode indicar aumento do número de morcegos nas cavernas neste intervalo.

Mobilidade e variações sazonais das colônias inferidas pela temperatura

Uma vez detectadas que variações diárias na temperatura das cavernas estão associadas aos ritmos circadianos de presença ou ausência dos morcegos, agrupamos toda a série de registro de que pudessem indicar movimentos específicos de saída do abrigo, ou variações sazonais. Foram detectadas oscilações abruptas na temperatura em alguns meses em N5SM2 019 (dezembro/2021 e maio/2022; Figura 6) e N5SM2 099 (agosto, setembro e dezembro/2021, e maio/2022; Figura 6), e estes períodos foram analisados em detalhe, com um recorte de dois dias antes e dois dias após às oscilações destacadas (Figuras 7, 8 e 9). Estas oscilações apontam para variações no tamanho ou localização das populações dentro das cavernas, algumas em intervalos de 6 a 7 dias, outras em 24 a 48 horas (Figuras 7, 8 e 9).

For both caves, higher temperatures were always associated with the presence of more numerous colonies portions. In these same chambers (innermost chambers of both caves - N5SM2 019 and in areas 1 and 3 of cave N5SM2 099), in October 2021 maternity colonies for all species of the Pteronotus genus were observed. It is therefore plausible to state that the increase in temperature between September and January coincides with the reproductive period of Pteronotus, and may indicate an increase in the number of bats in the caves during this interval.

Mobility and seasonal variations of colonies inferred by temperature

Once it was detected that daily variations in the temperature of the caves are associated with the circadian rhythms of the bats' presence or absence, the entire series of temperature records from the caves was grouped in search of oscillations that could indicate specific movements out of the shelter, or seasonal variations. Abrupt temperature oscillations were detected in some months in N5SM2 019 (December/2021 and May/2022; Figure 6) and N5SM2 099 (August, September and December/2021, and May/2022; Figure 6), and these periods were analyzed in detail, with a cut-off of two days before and two days after the highlighted oscillations (Figures 7, 8 and 9). These oscillations point to variations in the size or location of the populations within the caves, some at intervals of 6 to 7 days, others in 24 to 48 hours (Figures 7, 8 and 9).

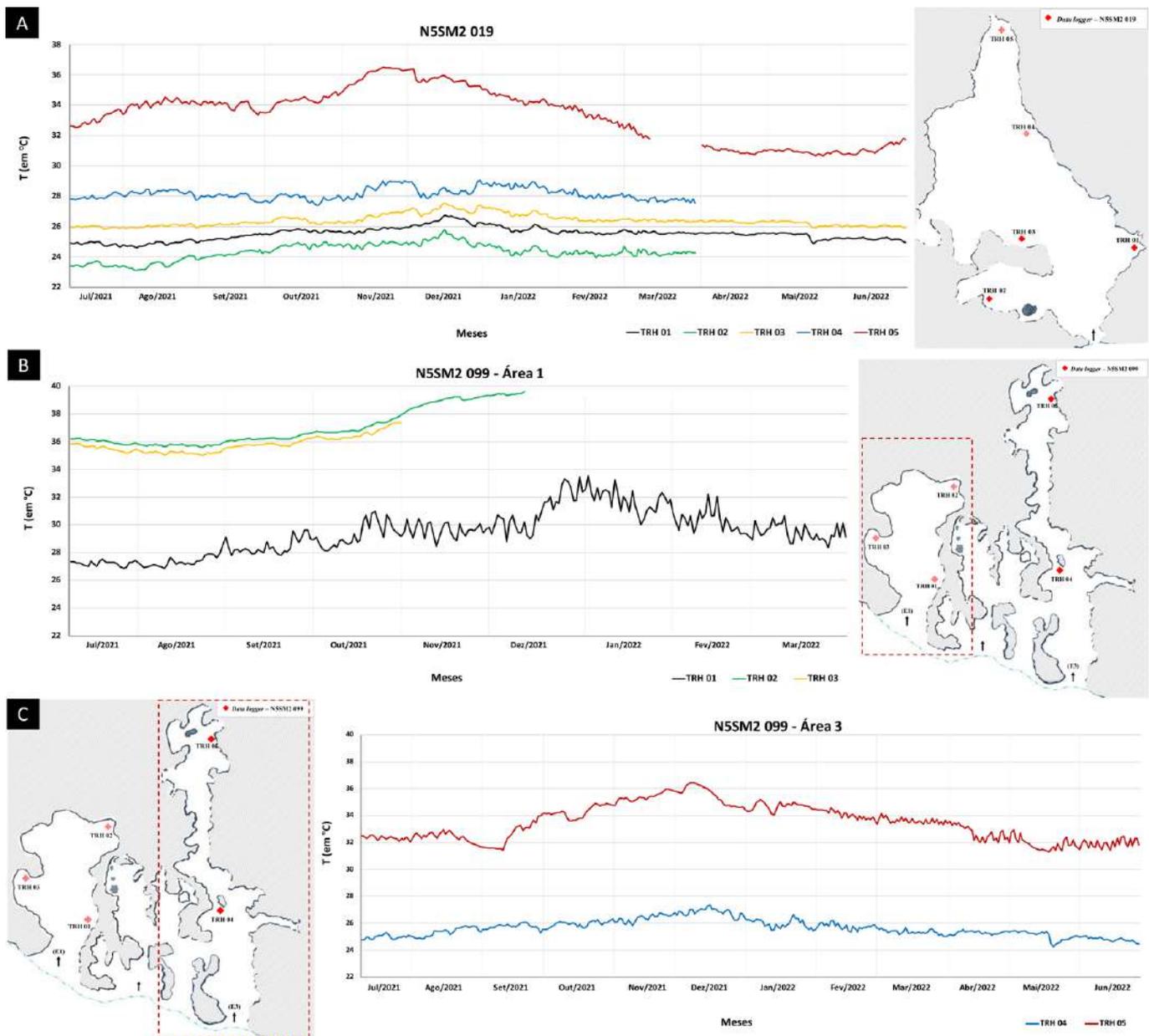


Figura 6 – Média diária da temperatura registrada nas cavernas N5SM2 019 (A) e N5SM2 099, na área acessada pela entrada 1 (B) e área acessada pela entrada 3 (C), nos períodos de julho de 2021 a junho de 2022 (A e C) e julho de 2021 a março de 2022 (B). Em N5SM2 019, após o mês de março não há registros de temperatura para os *data loggers* TRH 04 (substituído pelo TRH 02) (A). Em N5SM2 099, após o mês de outubro de 2021 e março de 2022 não têm registros de temperatura para os *data loggers* TRH 03 e TRH 02, respectivamente, da área 1 (B).

Figure 6 – Average daily temperature recorded in caves N5SM2 019 (A) and N5SM2 099, in the area accessed by entrance 1 (B) and the area accessed by entrance 3 (C), from July 2021 to June 2022 (A and C) and July 2021 to March 2022 (B). In N5SM2 019, after March there are no temperature records for the TRH 04 data loggers (replaced by TRH 02) (A). In N5SM2 099, after October 2021 and March 2022 there are no temperature records for the TRH 03 and TRH 02 data loggers, in area 1 (B).

A**N5SM2 019**

Período apontado: 15/05 A 22/05/2022

**B**

Período apontado: 29/11 A 06/12/2021

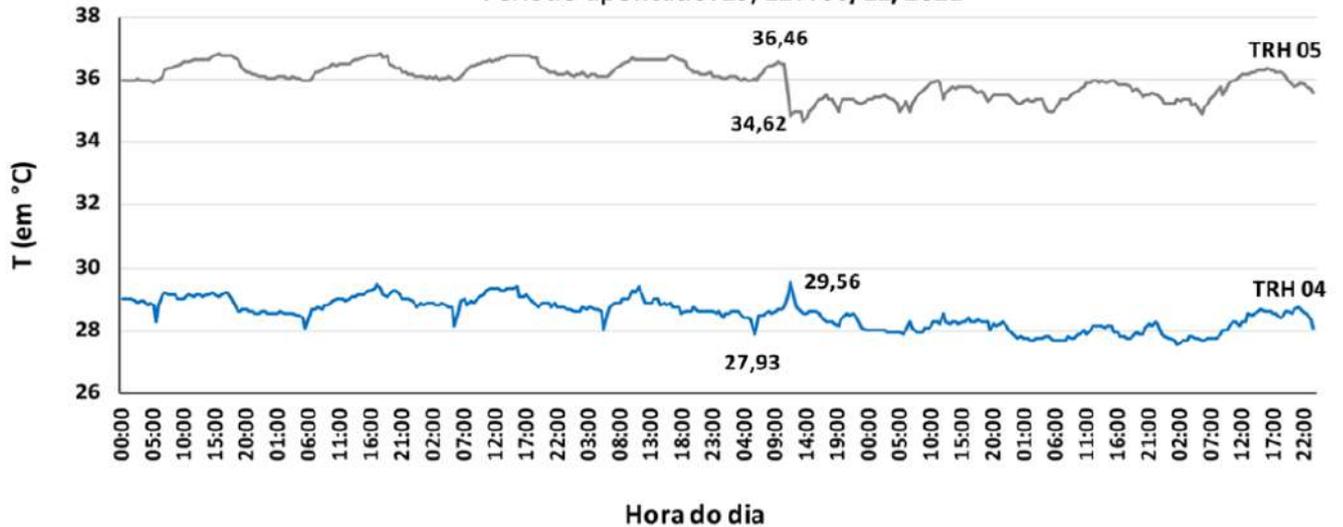


Figura 7 – Variação de cerca de 1°C entre 15 de maio a 22 de maio de 2022 registrada pelo data logger TRH 01 (A), e de cerca de 2°C entre 29 de novembro e 06 de dezembro de 2021 nos data loggers TRH 04 e TRH 05 (B), todos na caverna N5SM2 019.

Figure 7 – Variation of around 1°C between May 15 and May 22, 2022 recorded by data logger TRH 01 (A), and around 2°C between November 29 and December 6, 2021 in data loggers TRH 04 and TRH 05 (B), all installed in cave N5SM2 019.

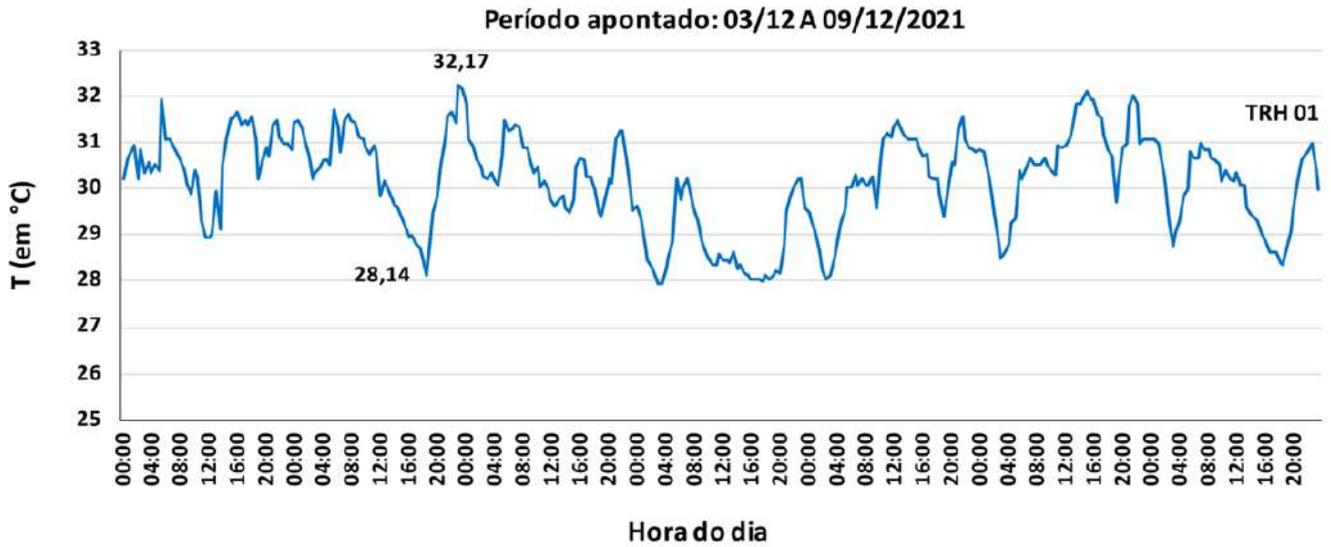
A**N5SM2 099****B**

Figura 8 - Variação de cerca 4°C na temperatura registrada pelo *data logger* TRH 01, entre 03 de dezembro a 09 de dezembro de 2021 (A), e de cerca de 2°C no *data logger* TRH 04, entre 16 de maio a 22 de maio de 2022 (B), ambos instalados na caverna N5SM2 099.

Figure 8 - Variation of around 4°C in the temperature recorded by the TRH 01 *data logger*, between December 3 and December 9, 2021 (A), and around 2°C in the TRH 04 *data logger*, between May 16 and May 22, 2022 (B), both installed in cave N5SM2 099.

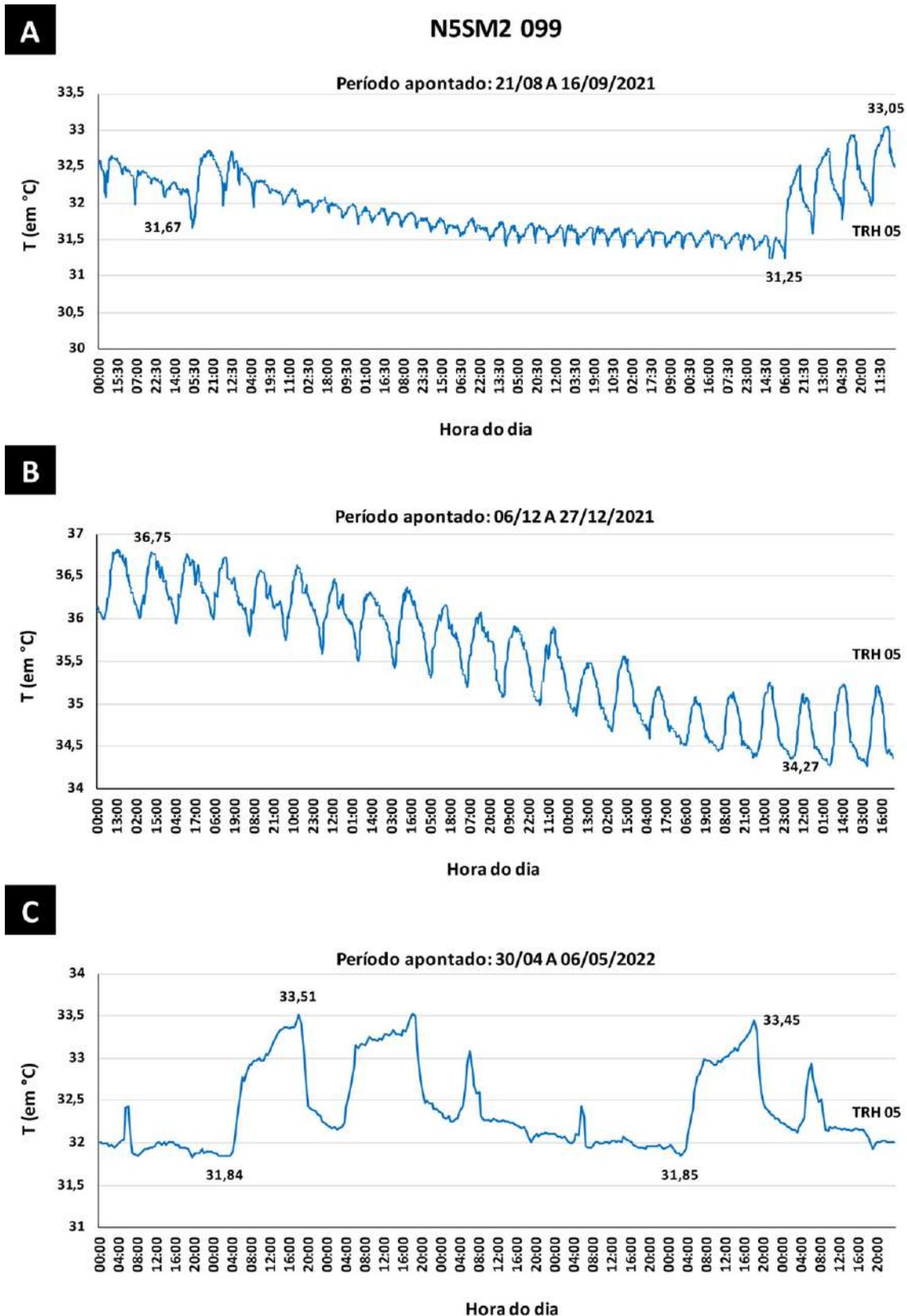


Figura 9 - Variação de cerca de 2°C na temperatura registrada entre 21 de agosto a 16 de setembro de 2021 (A), de cerca de 2,5°C entre 06 de dezembro a 27 de dezembro de 2021 (B), e de cerca de 2°C entre 30 de abril a 06 de maio de 2022 (C), todas registradas pelo data logger TRH 05, instalado na caverna N5SM2 099.

Figure 9 - Variation of around 2°C in the temperature recorded between August 21 and September 16, 2021 (A), around 2.5°C between December 6 and December 27, 2021 (B), and around 2°C between April 30 and May 6, 2022 (C), all recorded by the TRH 05 data logger installed in cave N5SM2 099.

Variações anuais e períodos reprodutivos inferidos pela temperatura

A existência de dados coletados em três anos permitiu a comparação da temperatura para um mesmo período (abril a setembro) entre diferentes anos (2019, 2021 e 2022; Figuras 10 e 11) e foi constatado um padrão semelhante na temperatura entre os anos, que aponta para os períodos reprodutivos nessas cavernas (veja o tópico Diferenças de temperatura intra- e inter-cavernas). Para excluir a possibilidade de influência externa nas flutuações observadas dentro das cavernas, as temperaturas internas e externas foram então comparadas em períodos iguais (15 de janeiro à 15 de fevereiro de 2022; Figuras 12 e 13). Utilizamos os dados de temperatura externa da caverna mais próxima N5SM2 057, distante quase 1 km das nossas *bat caves*. Essa caverna apresenta vegetação do entorno e incidência solar semelhantes às das *bat caves* analisadas. As comparações apontam que, enquanto as temperaturas mais próximas às entradas das cavernas apresentam alguma influência da temperatura externa, as temperaturas das câmaras mais profundas são descoladas das temperaturas externas, confirmando que estas câmaras mais quentes são, de fato, muito mais influenciadas pela presença/ausência dos morcegos.

Annual variations and reproductive periods inferred by temperature

The existence of data collected in three years made it possible to compare the temperature for the same period (April to September) between different years (2019, 2021 and 2022; Figures 10 and 11). A similar pattern in temperature was found between the years, which points to the reproductive periods in these caves (see the topic Intra- and inter-cave temperature differences). To exclude the possibility of external influence on the fluctuations observed inside the caves, the internal and external temperatures were then compared over equal periods (January 15 to February 15, 2022; Figures 12 and 13). The external temperature data from the nearest cave N5SM2 057 was used, which is almost 1 km away from the bat caves. This cave has similar surrounding vegetation and solar incidence to the analyzed bat caves. The comparisons show that, while the temperatures closest to the cave entrances show some influence from the external temperature, the temperatures in the deeper chambers are detached from the external temperatures, confirming that these warmer chambers are, in fact, much more influenced by the presence/absence of bats.

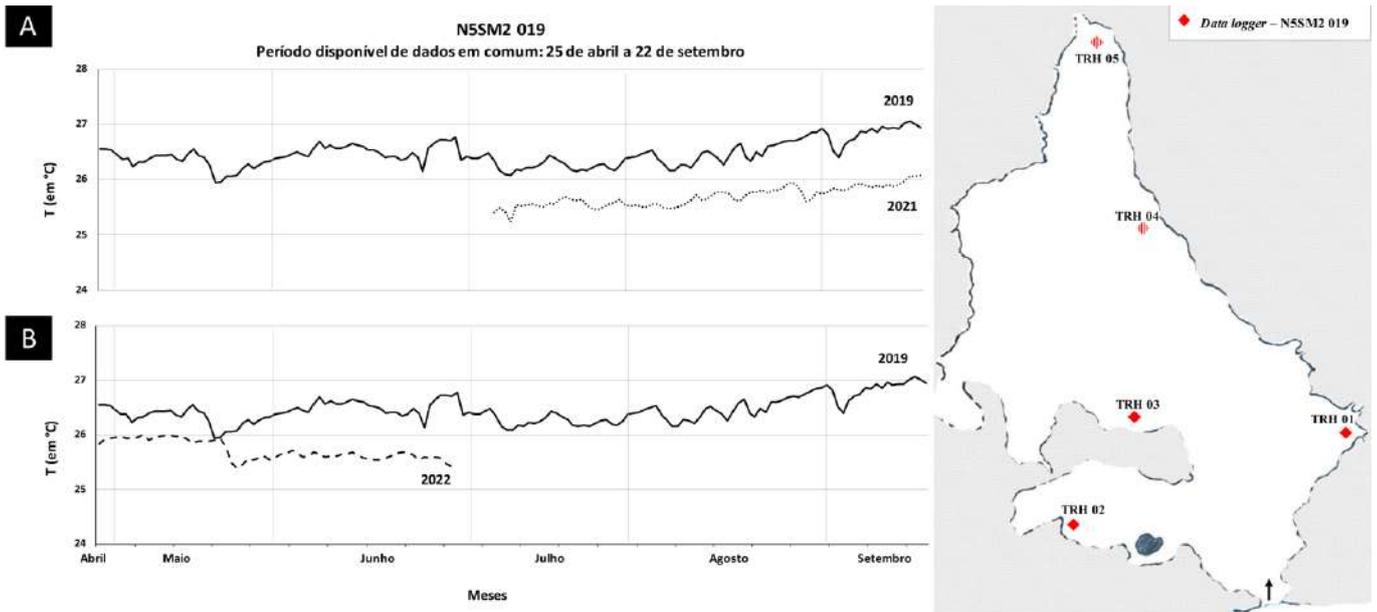


Figura 10 – Comparação da temperatura interna da *bat cave* N5SM2 019, nos anos de 2019 e 2021 (A) e 2019 e 2022 (B), entre os meses de abril e setembro.

Figure 10 – Comparison of the internal temperature of bat cave N5SM2 019, in the years 2019 and 2021 (A) and 2019 and 2022 (B), between the months of April and September.

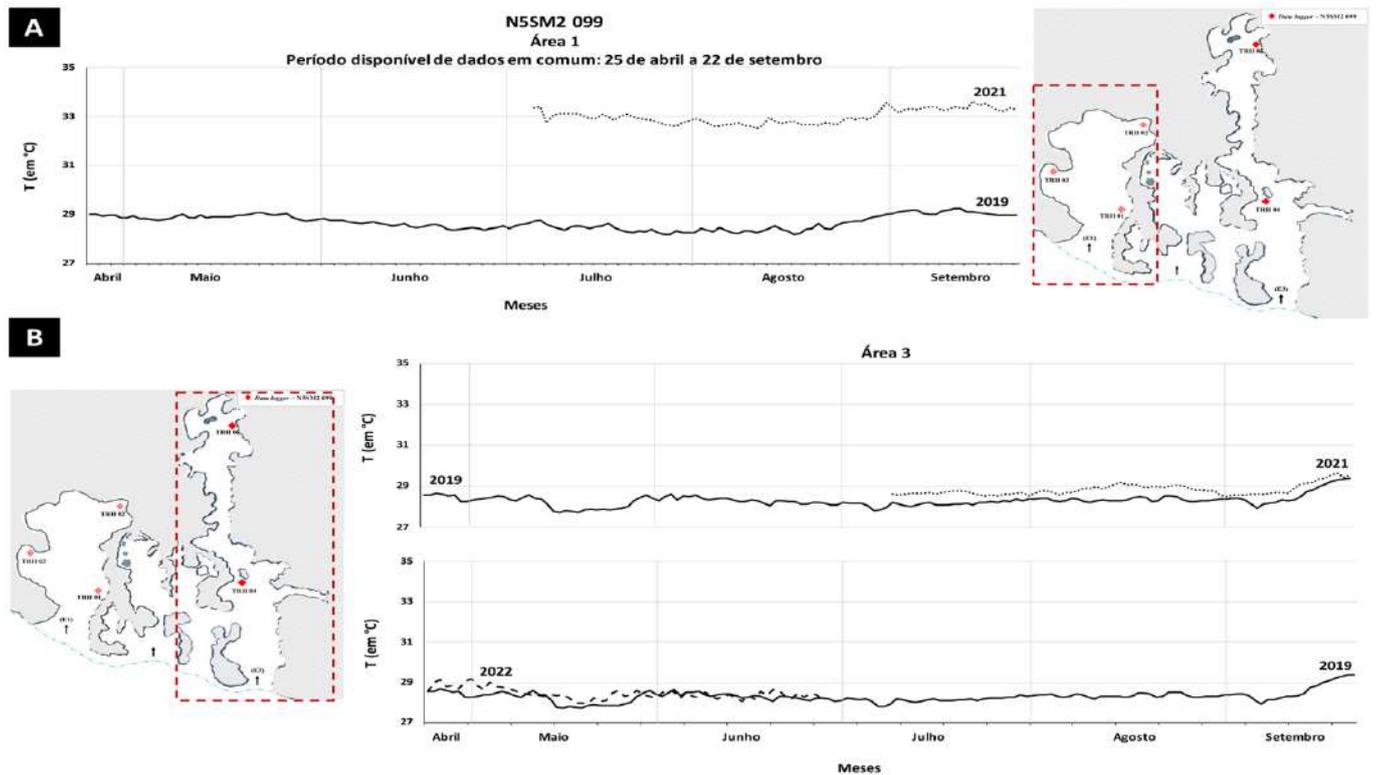


Figura 11 – Média diária da temperatura interna da *bat cave* N5SM2 099 entre os meses de abril e setembro na área acessada pela entrada 1 (A; dados para 2019 e 2021) e área acessada pela entrada 3 (B; dados para 2019, 2021 e 2022).

Figure 11 – Average daily internal temperature of bat cave N5SM2 099 between April and September in the area accessed by entrance 1 (A; data for 2019 and 2021) and the area accessed by entrance 3 (B; data for 2019, 2021 and 2022).

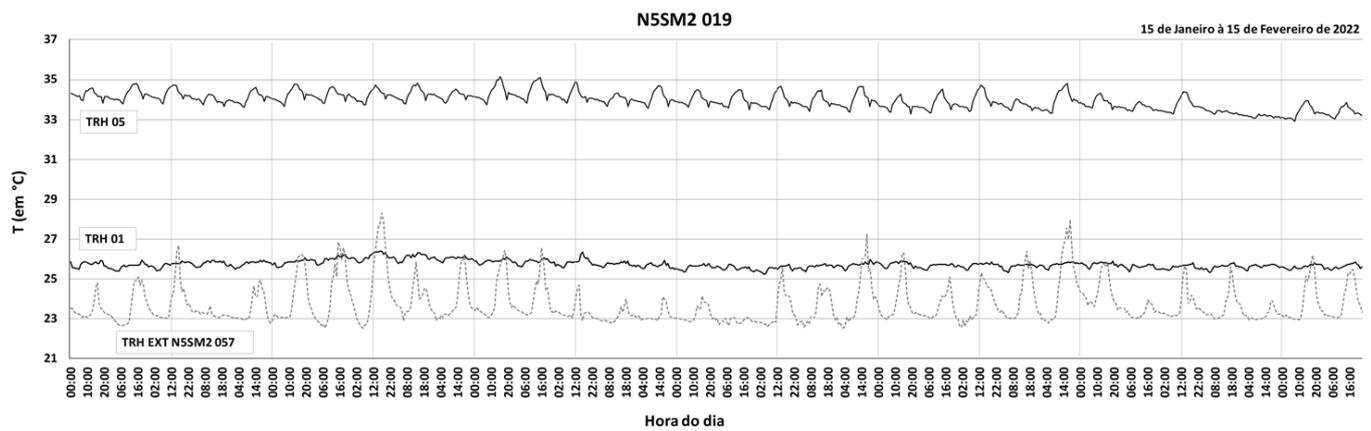


Figura 12 – Temperatura média registrada pelos *data loggers* TRH 01 (próximo à entrada) e TRH 05 (mais interno) na caverna N5SM2 019, e a temperatura média externa (TRH EXT, obtido junto à caverna N5SM2 057), no período de 15 de janeiro à 15 de fevereiro de 2022.

Figure 12 – Average temperature recorded by *data loggers* TRH 01 (near the entrance) and TRH 05 (more internal) in cave N5SM2 019, and the average external temperature (TRH EXT, obtained from cave N5SM2 057), from January 15 to February 15, 2022.

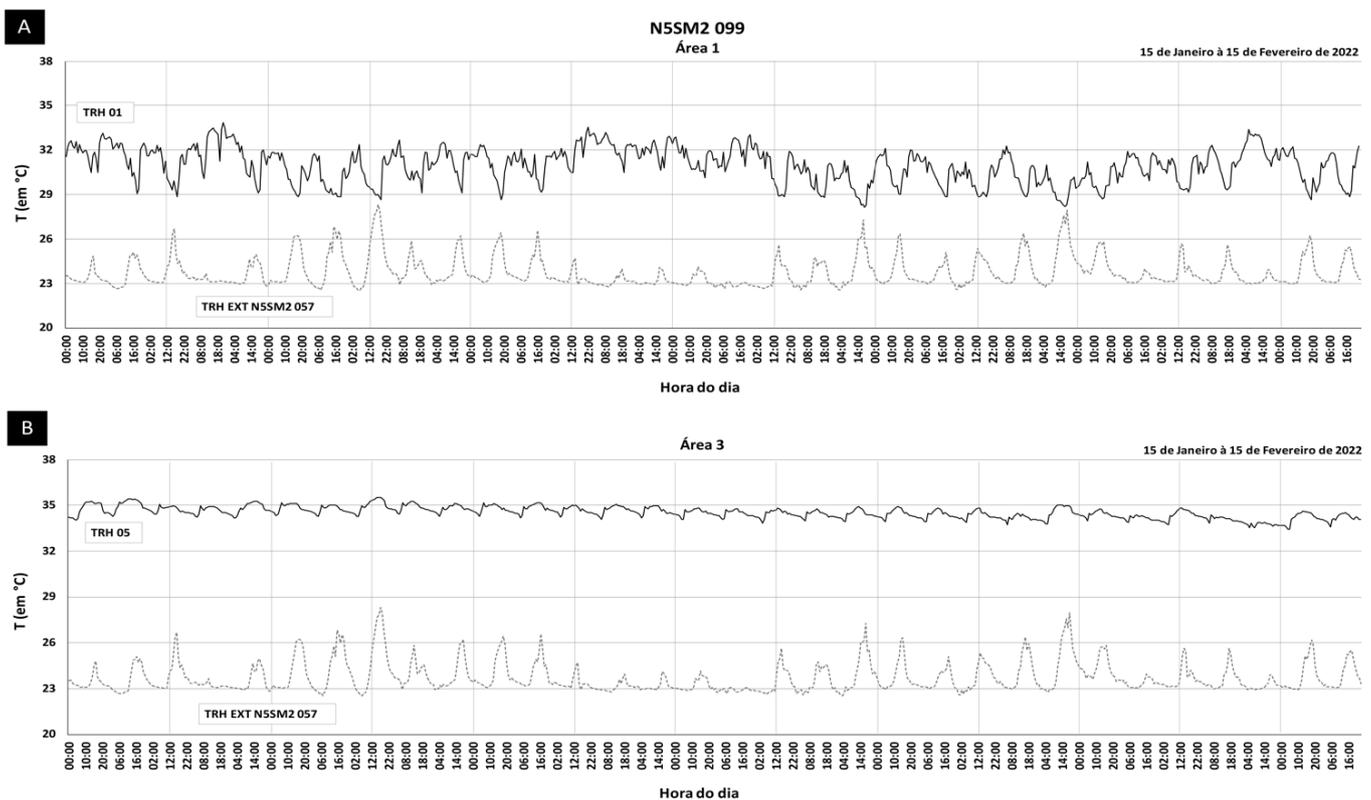


Figura 13 – Temperaturas médias registradas pelo *data logger* TRH 01 (A), instalado na área acessada pela entrada 1, pelo o *data logger* TRH 05 (B), instalado na área acessada pela entrada 3, ambos na caverna N5SM2 099, e a temperatura média externa (TRH EXT, obtido junto à caverna N5SM2 057), no período de 15 de janeiro à 15 de fevereiro de 2022.

Figure 12 – Average temperatures recorded by the TRH 01 *data logger* (A), installed in the area accessed by entrance 1, by the TRH 05 *data logger* (B), installed in the area accessed by entrance 3, both in cave N5SM2 099, and the average external temperature (TRH EXT, obtained from cave N5SM2 057), from January 15 to February 15, 2022.

DISCUSSÃO

Dinamismo das colônias e sazonalidade inferidos pela temperatura

O monitoramento térmico contínuo e de longo prazo em duas cavernas (N5SM2 019 e N5SM2 099) na região de Carajás, estado do Pará, na Amazônia Brasileira, apontou claramente que as temperaturas internas destas cavernas são mais elevadas que as temperaturas externas, e pouco influenciadas por estas últimas, sendo, na verdade, claramente associadas à presença de grandes colônias de morcegos do gênero *Pteronotus*. Estas características permitem apontar que N5SM2 019 e N5SM2 099 são *bat caves/hot caves* (Ladle et al. 2012). *Bat caves* são consideradas abrigos climaticamente mais estáveis comparado ao ambiente externo, porém, destacam-se de outras cavidades exatamente por suas populações excepcionais de morcegos e elevada temperatura interna (De La Cruz, 1992; Ladle et al. 2012). Cavernas desse tipo já foram relatadas na região Neotropical, no México (Dalquest & Hall, 1949), Cuba (Tejedor et al., 2005), Venezuela (De La Cruz, 1992) e na região do Caribe (Rivera-Marchand & Rodríguez-Durán, 2001; Tejedor et al., 2005). No Brasil, há registros de *bat caves* para as regiões Norte (Piló et al., no prelo; este estudo) e Nordeste (Rocha, 2013; Vargas-Mena et al., 2018; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022).

A temperatura em N5SM2 019 e N5SM2 099 mostrou-se um *proxy* útil para entender o uso desses abrigos, apontando desde padrões circadianos, até sazonais, além de períodos de maior densidade de indivíduos no interior das cavernas, e eventos de mobilidade desses animais dentro das cavernas e entre as cavernas. O monitoramento contínuo e de longo prazo realizado

DISCUSSION

Colony dynamism and seasonality inferred from temperature

Continuous, long-term thermal monitoring in two caves (N5SM2 019 and N5SM2 099) in the Carajás region, Pará state, in the Brazilian Amazon, has clearly shown that the internal temperatures of these caves are higher than the external temperatures. They are little influenced by the latter, and are in fact clearly associated with the presence of large colonies of Pteronotus genus bats. These characteristics suggest that N5SM2 019 and N5SM2 099 are bat caves/hot caves (Ladle et al. 2012). Bat caves are considered to be climatically more stable shelters compared to the external environment, but they stand out from other caves precisely because of their exceptional bat populations and high internal temperature (De La Cruz, 1992; Ladle et al. 2012). Caves of this type have already been reported in the Neotropics, in Mexico (Dalquest & Hall, 1949), Cuba (Tejedor et al., 2005), Venezuela (De La Cruz, 1992) and the Caribbean (Rivera-Marchand & Rodríguez-Durán, 2001; Tejedor et al., 2005). In Brazil, there are records of bat caves for the North (Piló et al., in press; this study) and Northeast regions (Rocha, 2013; Vargas-Mena et al., 2018; Otálora-Ardila et al., 2019; Pimentel et al., 2022).

The temperature in N5SM2 019 and N5SM2 099 proved to be a useful proxy for understanding the use of these shelters, pointing to daily and seasonal patterns, as well as periods of higher density of individuals inside the caves, and mobility events of these animals within and between caves. The continuous and long-term monitoring carried out in these bat caves has enabled a more detailed reconstruction of the thermal signature for these

nessas *bat caves* possibilitou uma reconstrução mais detalhada da assinatura térmica para esses ambientes, ressaltando o caráter dinâmico e bastante peculiar destas cavernas. Apesar de estarem muito próximas uma da outra (~50 metros), estas cavernas apresentam temperaturas internas que se comportaram de forma completamente independente. As temperaturas em ambas são heterogêneas dentro e entre si, com temperaturas mais baixas próximo à entrada, com pouca influência da temperatura externa, e temperaturas mais elevadas nas partes mais internas dessas cavernas, onde estão localizadas colônias mais numerosas de morcegos. Assim, a temperatura não somente é alterada diariamente pela saída dos morcegos para o forrageio ao anoitecer e retorno próximo ao amanhecer, mas também pela quantidade de morcegos e pelas áreas de preferências deles dentro da caverna. Esse gradiente de temperatura pôde ser observado com maior nitidez em N5SM2 019. Variações na temperatura de diferentes partes das cavernas podem determinar as áreas preferidas para a ocupação das espécies e de grandes colônias (Barros *et al.*, 2020), incluindo a existência de câmaras específicas que funcionam como maternidades para os morcegos do gênero *Pteronotus*.

A quantidade de morcegos utilizando essas *bat caves* também se mostrou heterogênea e dinâmica ao longo do tempo, variando de ~11.000 a ~16.000 em N5SM2 019, e de ~53.000 a ~88.500 em N5SM2 099. Evidências – como o aumento significativo da temperatura entre setembro e janeiro – podem indicar que essas oscilações estão associadas aos períodos reprodutivos das espécies que usam estas cavernas, e parecem se repetir anualmente (dados para 2019, 2021 e 2022), apontando para uma possível sazonalidade

*environments, highlighting the dynamic and quite peculiar character of these caves. Despite being very close to each other (~50 meters), these caves have internal temperatures that behave completely independently. The temperatures in both caves are heterogeneous within and between each other, with lower temperatures near the entrance, with little influence from the outside temperature, and higher temperatures in the innermost parts of the caves, where the most numerous bat colonies are located. Therefore, the temperature is not only altered daily by bats leaving to forage at dusk and returning at dawn, but also by the number of bats and their preferred areas within the cave. This temperature gradient could be seen most clearly in N5SM2 019. Variations in the temperature of different parts of the caves can determine the preferred areas for the occupation of species and large colonies (Barros *et al.*, 2020), including the existence of specific chambers that function as maternity wards for bats of the *Pteronotus* genus.*

*The number of bats using these bat caves was also heterogeneous and dynamic over time, ranging from ~11,000 to ~16,000 in N5SM2 019, and from ~53,000 to ~88,500 in N5SM2 099. Evidence, such as the significant increase in temperature between September and January, may indicate that these oscillations are associated with the reproductive periods of the species that use these caves, and seem to be repeated annually (data for 2019, 2021 and 2022), which points to a possible seasonality in these bat caves. This increase in the cave's thermal signature may indicate reproductive periods and therefore a greater abundance of individuals using these shelters. These data coincide with breeding periods reported in the literature for *P. gymnonotus* and even *P. personatus*, reporting breeding seasons occurring at different times of the year throughout their geographical range (Deleva & Chaverri, 2018;*

dade nessas *bat caves*. Esse aumento na assinatura térmica da caverna pode indicar períodos reprodutivos e, portanto, de maior abundância de indivíduos utilizando esses abrigos. Esses dados coincidem com períodos reprodutivos reportados na literatura para *P. gymnonotus* e até *P. personatus*, reportando estações de reprodução ocorrendo em diferentes épocas do ano em toda a sua faixa geográfica (Deleva & Chaverri, 2018; Pavan & Tavares, 2020). Baseado nos dados de temperatura, estimamos que o período reprodutivo em N5SM2 019 e N5SM2 099 deve ocorrer entre setembro e janeiro, com picos populacionais entre novembro e o começo de janeiro.

Seleção de microhabitats dentro das cavernas

Morcegos cavernícolas selecionam diferentes atributos relacionados às características físicas e ambientais existentes na caverna (Brunet & Medellín, 2001). Enquanto a presença de algumas espécies é associada ao tamanho da caverna, para outras a complexidade, disponibilidade de diferentes microhabitats (como cúpulas, buracos e fraturas), ou as condições microclimáticas (temperatura, umidade ou luminosidade) são variáveis mais determinantes (Phelps *et al.*, 2016; Barros *et al.*, 2020). Porém, para algumas espécies de morcegos a relação com o abrigo é ainda mais importante, uma vez que estas podem formar grandes colônias com dezenas ou até centenas de milhares de indivíduos e dependerem da caverna para a manutenção de suas populações (Rodríguez-Durán, 2009). Esse parece ser o caso das grandes colônias de *Pteronotus* presentes nas *bat caves* aqui estudadas. Estudos apontam que para *P. gymnonotus* e *P. personatus*, principalmente, as condi-

Pavan & Tavares, 2020). Based on the temperature data, it is estimated that the breeding period in N5SM2 019 and N5SM2 099 should occur between September and January, with population peaks between November and early January.

Cave microhabitat selection

Cave bats select different attributes related to the physical and environmental characteristics of the cave (Brunet & Medellín, 2001). While the presence of some species is associated with the size of the cave, for others the complexity, availability of different microhabitats (such as domes, holes and fractures), or microclimatic conditions (temperature, humidity or luminosity) are more determining variables (Phelps et al., 2016; Barros et al., 2020). However, for some bat species, the relationship with shelter is even more important, since they can form large colonies with tens or even hundreds of thousands of individuals and depend on the cave to maintain their populations (Rodríguez-Durán, 2009). This seems to be the case with the large colonies of Pteronotus present in the bat caves studied here. Studies show that, for P. gymnonotus and P. personatus in particular, the microclimatic conditions in the caves have a direct influence on post-natal development

ções microclimáticas nas cavernas têm influência direta sobre o desenvolvimento pós-natal e o recrutamento da prole (Rocha, 2013; Pavan & Tavares, 2020).

Detectamos que em N5SM2 019 as espécies coabitavam no mesmo espaço, parecendo não haver preferência na ocupação e uso do ambiente. Porém, em N5SM2 099 houve segregação evidente entre as espécies do gênero *Pteronotus* e entre as demais espécies presentes. Barros *et al.* (2022) identificaram que grandes colônias de *Pteronotus* estavam relacionadas as características de estabilidade ambiental e teto, e a presença de tais colônias influenciava na variação de temperatura no interior das cavernas. Mais além, estes autores mostraram que espécies diferentes de *Pteronotus* mostraram preferência por diferentes características climáticas e de teto combinadas. Mesmo não sendo possível uma análise mais aprofundada nesse projeto, sobre as preferências físicas dentro das cavernas para a seleção pelos morcegos, ficou evidenciado que os diferentes microhabitats existentes em N5SM2 099 podem estar contribuindo para a segregação de espécies de *Pteronotus* observadas, bem como para as demais espécies dessa caverna. Para *P. rubiginosus/P. alitonus* não foram encontradas na literatura atributos determinantes para o seu uso e ocupação em determinada área da caverna. Entretanto, de forma geral, os morcegos não toleram baixas temperaturas, uma vez que possuem baixas taxas de metabolismo basal (Rodríguez-Dúran, 2009).

P. gymnonotus e *P. peronotus* são espécies caracterizadas por reduzido cuidado parental. Os neonatos ficam em berçários separados de suas mães na maior parte do dia e o desenvolvimento dos pelos nesses filhotes é tardio, iniciando-se

and offspring recruitment (Rocha, 2013; Pavan & Tavares, 2020).

It was detected that in N5SM2 019 the species cohabited in the same space, and there seemed to be no preference in the occupation and use of the environment. However, in N5SM2 099 there was clear segregation between the species of the Pteronotus genus and between the other species present. Barros et al. (2022) identified that large Pteronotus colonies were related to environmental stability and ceiling characteristics, and the presence of such colonies influenced the temperature variation inside the caves. Furthermore, these authors showed that different Pteronotus species showed a preference for different climatic and ceiling characteristics combined. Although it was not possible to carry out a more in-depth analysis of the physical preferences within the caves for selection by the bats, it was clear that the different microhabitats in N5SM2 099 may be contributing to the segregation of the observed Pteronotus species as well as to the other species in this cave. For P. rubiginosus/P. alitonus, no determinant attributes were found in the literature for their use and occupation in a given area of the cave. However, in general, Mormoopidae bats do not tolerate low temperatures, since they have low basal metabolism rates (Rodríguez-Dúran, 2009).

P. gymnonotus and P. peronotus are species characterized by reduced parental care. The neonates stay in separate nurseries from their mothers for most of the day and the fur development in these offspring is late, beginning only in the fifth week after birth (Rocha, 2013). These factors may explain the need to shelter in caves with high environmental stability, as well as justifying the presence of these large colonies in the innermost portions, as also identified here. In fact, species of the Pteronotus genus are classified as strictly cave-

apenas na quinta semana após o nascimento (Rocha, 2013). Tais fatores podem explicar a necessidade de se abrigar em cavernas com elevada estabilidade ambiental, além de justificar a presença dessas grandes colônias nas porções mais internas, como também identificado aqui. De fato, espécies do gênero *Pteronotus* são classificadas como estritamente cavernícolas, pois são dependentes da caverna para completar seu ciclo de vida (Pavan & Tavares, 2020). A seleção de abrigos específicos relacionados a padrões reprodutivos e populacionais já foram reportados também para *Pteronotus fulvus* e *P. mesoamericanus*, no México (Hernández-Aguilar & Santos-Moreno, 2020).

Implicações das *bat caves* da FLONA de Carajás

Bat caves podem frequentemente abrigar populações com mais de 100.000 morcegos, e entender a dinâmica em cavernas com populações excepcionais em relação à abundância, bem como quais características favorecem a ocorrência de colônias com milhares de indivíduos, pode servir como um direcionamento para outros estudos referentes à identificação de áreas e cavernas prioritárias para inventários e/ou monitoramento, e ainda como base para estratégias de conservação (Phelps et al., 2016).

Apesar da alta riqueza de espécies de morcegos reportadas para a FLONA de Carajás (Tavares et al., 2012), são insuficientes os estudos comparativos de ecologia que avaliem a distribuição dessas comunidades nos diferentes ecossistemas da FLONA de Carajás, incluindo cavernas, e mais especificamente *bat caves*. Há espécies de morcegos muito sensíveis às alterações na disponibilidade de abrigo e alimento e, por isso, esse

-dwelling, as they are dependent on the cave to complete their life cycle (Pavan & Tavares, 2020). The selection of specific shelters related to reproductive and population patterns has also been reported for Pteronotus fulvus and P. mesoamericanus in Mexico (Hernández-Aguilar & Santos-Moreno, 2020).

Bat caves implications on Carajás National Forest

Bat caves can often harbor populations of more than 100,000 bats. Understanding the dynamics in caves with exceptional abundance populations, as well as which characteristics favor the occurrence of colonies with thousands of individuals, can serve as a guide for other studies regarding the identification of priority areas and caves for inventories and/or monitoring, and also as a basis for conservation strategies (Phelps et al., 2016).

Despite the high bat species richness reported for the Carajás National Forest (Tavares et al., 2012), there are insufficient comparative ecology studies evaluating the distribution of these communities in the different ecosystems of the Carajás National Forest, including caves, and more specifically bat caves. There are bat species that are very sensitive to changes in the availability of shelter and food. For this reason, this group can be considered a good indicator of environmental quality. However, determining the living area, habitat and abundance

grupo pode ser considerado um bom indicador de qualidade ambiental. No entanto, a determinação da área de vida, hábitat e da abundância desses mamíferos encontrados na FLONA são as principais lacunas que limitam o conhecimento da atuação desses animais nos processos de manutenção dos ecossistemas locais, como também limita ou mesmo induz a erros na inferência de seu grau de ameaça (Tavares *et al.*, 2012). A determinação dos padrões de deslocamento e das áreas de vida são importantes principalmente, para as espécies registradas em cavidades e das com potencial para usar esses ambientes (Tavares *et al.*, 2012). As espécies registradas nas *bat caves* aqui estudadas cumprem esses requisitos.

As espécies de áreas onde a mineração é prevista demandam estudos mais detalhados sobre sua distribuição e abundância e de comportamento perante os impactos por vezes difusos, da mineração. São espécies reconhecidamente sob ameaça no cenário de perda do seu ecossistema (Tavares *et al.*, 2012). Tavares *et al.* (2012) já identificaram 75 espécies de morcegos na FLONA de Carajás, sendo que 23 dessas espécies habitavam cavernas. No Brasil, 73 das 182 espécies de morcegos conhecidas para o país usam cavernas como abrigos principais ou alternativos (Torres & Bichuette, 2019; Leal & Bernard, 2021; Garbino *et al.*, 2022). A diversidade de microhabitats pode contribuir para aumentar a riqueza de morcegos nos abrigos (Brunet & Medellín, 2001; Phelps *et al.*, 2016; Barros *et al.*, 2020). Nossos registros corroboram esses estudos, visto que N5SM2 099 além de apresentar maior diversidade de microhabitats, também apresentou maior riqueza de espécies em relação a N5SM2 019. Mesmo com a proximidade entre as entradas dessas cavernas (menos de 50 m),

of these mammals found in the National Forest are the main gaps that limit knowledge of these animals role in the maintenance processes of local ecosystems, as well as limiting or even leading to errors in inferring their degree of threat (Tavares et al., 2012). Determining movement patterns and home ranges is especially important for species recorded in caves and those with the potential to use these environments (Tavares et al., 2012). The species recorded in the bat caves studied here meet these requirements.

Species from areas where mining is planned require more detailed studies of their distribution and abundance, as well as their behavior in the face of the sometimes diffuse impacts of mining. These are species that are known to be under threat in the event of their ecosystem loss (Tavares et al., 2012). Tavares et al. (2012) have already identified 75 bat species in the Carajás National Forest, 23 of which inhabit caves. In Brazil, 73 of the 182 bat species known for the country use caves as their main or alternative shelters (Torres & Bichuette, 2019; Leal & Bernard, 2021; Garbino et al., 2022). The diversity of microhabitats can contribute to increasing the richness of bats in shelters (Brunet & Medellín, 2001; Phelps et al., 2016; Barros et al., 2020). The records corroborate these studies, as N5SM2 099 not only had a greater diversity of microhabitats, but also a higher species richness than N5SM2 019. Even with the proximity between the entrances to these caves, there were species that were only recorded in the first cave.

Cave bats are often considered to be faithful to their shelters, but a colony can alternate in the use of these shelters (Altringham, 1996). In certain cases, movement between shelters can cause marked variations in population size over different periods (Stepanian & Wainwright, 2018). These sharp fluc-

houve espécies que só foram registradas na primeira caverna.

Morcegos cavernícolas são frequentemente considerados fiéis aos seus abrigos, mas, uma colônia pode se alternar na utilização desses abrigos (Altringham, 1996). Em determinados casos, a movimentação entre abrigos pode provocar variações acentuadas no tamanho da população em diferentes períodos (Stepanian & Wainwright, 2018). Essas flutuações acentuadas reforçam o caráter dinâmico de alguns abrigos. Durante o monitoramento aqui apresentado registramos que a abundância de morcegos variou inter- e intra-cavernas. Para N5SM2 019 e N5SM2 099 as variações na abundância estão relacionadas à presença de colônias de morcegos da família Mormoopidae. Esta família é conhecida por formarem grandes congregações (Rocha, 2013; Tavares *et al.*, 2012; Deleva & Chaverri, 2018; Vargas-Mena *et al.*, 2018; Pimentel *et al.*, 2022). O caráter dinâmico observado é uma clara mensagem sobre a necessidade de monitoramento contínuo e de longo prazo para o melhor entendimento destes abrigos e de suas relações ecológicas (Otálora-Ardila *et al.* 2019). Inventários curtos e muito esporádicos inevitavelmente levarão a conclusões equivocadas sobre abrigos como estes, com sérias implicações ecológicas, conservacionistas e de licenciamento.

Com as amostragens realizadas não foi possível inferir se esses morcegos estão transitando entre essas cavernas apenas ou se estão utilizando outros abrigos. A marcação/recaptura maciça de indivíduos é necessária para responder a este questionamento. Porém, a possibilidade de trânsito entre as cavernas é bastante plausível (vide Leal & Bernard, 2021). Na macro região de Carajás há registros de outras cavernas que se

tuations reinforce the dynamic nature of some shelters. During the monitoring presented here, it was recorded that bat abundance varied between and within caves. For N5SM2 019 and N5SM2 099 the variations in abundance are related to the presence of bat colonies from the Mormoopidae family. This family is known for forming large congregations (Rocha, 2013; Tavares et al., 2012; Deleva & Chaverri, 2018; Vargas-Mena et al., 2018; Pimentel et al., 2022). The dynamic nature observed is a clear message about the need for continuous and long-term monitoring to better understand these shelters and their ecological relationships (Otálora-Ardila et al. 2019). Short and very sporadic inventories will inevitably lead to erroneous conclusions, with serious ecological, conservation and licensing implications.

With the sampling carried out, it was not possible to infer whether these bats are only transiting between these caves or whether they are using other shelters. Massive marking/recapture of individuals is necessary to answer this question. However, the possibility of transit between caves is quite plausible (see Leal & Bernard, 2021). In the Carajás macro-region, there are records of other caves that are configured as bat caves and which therefore present suitable conditions for the establishment of these large colonies of Pteronotus genus bats (Piló et al., in press). Monitoring these caves, with the marking of individuals, should be considered a priority and is highly recommended.

The bat caves in this study are located in areas with intense mineral exploitation, whose expansion is quite advanced and therefore requires greater attention. The exceptional nature of these caves gives them the degree of maximum ecological relevance (Brazil, 2017), and so they should be treated like such for environmental licensing purposes. Information

configuram como *bat caves* e que, portanto, apresentam condições adequadas para o estabelecimento dessas grandes colônias de morcegos do gênero *Pteronotus* (Piló *et al.*, no prelo). O monitoramento destas cavernas, com a marcação de indivíduos, deve ser considerado prioritário e é altamente recomendado.

As *bat caves* desse estudo encontram-se em áreas com intensa exploração mineral, cuja expansão encontra-se bastante avançada e, portanto, requer uma atenção maior. O caráter excepcional destas cavernas lhes confere o grau de máxima relevância ecológica (Brasil, 2017), e assim elas devem ser tratadas para fins de licenciamento ambiental. De maneira geral, as informações sobre as *bat caves* ainda são incipientes no Brasil, sendo fundamental o fomento de estudos sobre esses ambientes, especialmente quando elas se encontram em situações que envolvam atividades de licenciamento ambiental. Sendo assim, *bat caves* precisam de um acompanhamento diferenciado em relação ao uso e pressões que experimentam, principalmente frente às alterações e tentativas de flexibilizações que vêm ocorrendo na legislação espeleológica brasileira (vide Ferreira *et al.*, 2022).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Luís Beethoven Piló (*in memorian*) pelos dados compartilhados. Agradecemos a Vale S.A., representada pela Gerência de Espeleologia do setor Norte e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), por permitirem acesso às áreas amostradas e por fornecerem apoio logístico para a realização do trabalho, além da concessão das autorizações para a pesquisa. Ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e

on bat caves is still incipient in Brazil, and it is essential to promote studies on these environments, especially when they are in situations involving environmental licensing activities. As such, bat caves need special monitoring in relation to the use and pressures they experience, especially in the face of the changes and attempts to make Brazilian speleological legislation more flexible (see Ferreira et al., 2022).

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Luís Beethoven Piló (in memorian) for the data he shared. We would like to thank Vale S.A., represented by the Northern Sector Speleology Management, and the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio), for allowing access to the areas sampled and for providing logistical support for the work, as well as granting the research permits. To the Brazilian Institute for Development and Sustain-

Sustentabilidade (IABS), através do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica (TCCE Nº 1/2018) pelo financiamento da pesquisa e ao Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste (CEPAN) pela gestão e administração dos recursos financeiros.

ability (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade - IABS), through the Speleological Compensation Commitment Term (TCCE No. 1/2018) for funding the research and to the Northeast Environmental Research Center (Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste - CEPAN) for managing and administering the financial resources.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ALTRINGHAM, J. D. Bats, biology and behaviour. *Oxford University Press*, Oxford, 262p, 1996.

ÁLVARES, A. C.; STAPE, J. S.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, P. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2014.

BARROS, J. S. P.; BERNARD, E.; FERREIRA, R.L. 2020. Ecological preferences of neotropical cave bats in roost site selection and their implications for conservation. *Basic and Applied Ecology*, v. 45, p. 31-41, 2020.

BARROS, J. S. P. *Seleção e uso de cavernas por morcegos e suas implicações para a classificação de relevância destes ambientes*. 2022. 188 f. Tese (Doutorado em Biologia Animal) – Centro de Biociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

BRASIL. MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Instrução Normativa Nº 2, de 30 de agosto de 2017*. Define a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=137302.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2022.

BRUNET, A. K.; MEDELLIN, R. A. The species-area relationship in bat assemblages of tropical caves. *Journal of Mammalogy*, v. 82, n. 4, p. 1114-1122, 2001.

CANIE. CADASTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES ESPELEOLÓGICAS. *Banco de dados do patrimônio espeleológico nacional*. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2022. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 29 dez. 2022.

DALQUEST, W. W.; HALL, E. R. Five bats new to the known fauna of Mexico. *Journal of Mammalogy*, v. 30, p. 424-427, 1949.

DE LA CRUZ, J. 1992. Bioecologia de las grutas de calor. *Mundos Subterráneos*, v. 3, p. 7-22, 1992.

DELEVA, S.; CHAVERRI, G. Diversity and conservation of cave-dwelling bats in the Brunca Region of Costa Rica. *Diversity*, v. 10, p. 1-15, 2018.

- DÍAZ, M. M.; SOLARI, S.; AGUIRRE, L. F.; AGUIAR, L. M. S.; BARQUEZ, R. B. 2016. *Clave de identificación de los murciélagos de Sudamérica*. 2016. 160 p. Publicación Especial n° 2, PCMA (Programa de Conservación de Murciélagos de Argentina), Argentina.
- FERREIRA, R. L.; BERNARD, E.; CRUZ, F. W. C. Jr.; PILÓ, L. B.; CALUX, A.; SOUZA-SILVA, M. BARLOW, J.; POMPEU, P. S.; CARDOSO, P. *et al.* Brazilian cave heritage under siege. *Science*, v. 375, n. 6586, p. 1238-1239, 2022.
- GARBINO, G. S.; BRANDÃO, M. V.; TAVARES, V. C. First confirmed records of Godman's Long-tailed Bat, *Choeroniscus godmani* (Thomas, 1903) (Chiroptera, Phyllostomidae), from Brazil and Panama. *Check List*, v. 18, n. 3, p. 493-499, 2022.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, I.; SANTOS-MORENO, A. Reproduction and population dynamics of cave-dwelling bats in Costa of Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*, v. 68, n. 3, p. 785-802, 2020.
- ICMBIO. INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Plano de Pesquisa – *Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás*. Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade. 82 p. Inédito, 2017.
- KUNZ, T. H. Roosting ecology. In: KUNZ, T. H (Ed.). *Ecology of bats*. Plenum Press. New York & London, 1982.
- LADLE, R. J.; FIRMINO, J. V.; MALHADO, A. C.; RODRÍGUEZ-DURÁN, A. Unexplored diversity and conservation potential of neotropical hot caves. *Conservation Biology*, v. 26, n. 6, p. 978-982, 2012.
- LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Morcegos cavernícolas do carste arenítico do Parque Nacional do Catimbau, nordeste do Brasil. *Mastozoología Neotropical*, v. 28, n. 2, p. 001-053, 2021.
- MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L. M.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazonica*, v. 35, p. 207-214, 2005.
- MOTA, N. F. O.; WATANABE, M. T. C.; ZAPPI, D. C.; HIURA, A. L.; PALLOS, J.; VIVEROS, R. S.; GIULIETTI, A. M.; VIANA, P. L. Cangas da Amazônia: a vegetação única de Carajás evidenciada pela lista de fanerógamas. *Rodriguésia*, v. 69, p. 1435-1488, 2018.
- OTÁLORA-ARDILA, A.; TORRES, J. M.; BARBIER, E.; PIMENTEL, N. T.; LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Thermally-Assisted Monitoring of Bat Abundance in an Exceptional Cave in Brazil's Caatinga Drylands. *Acta Chiropterologica*, v. 21, n. 2, p. 411-423, 2019.
- PAVAN, A. C.; TAVARES, V. C. *Pteronotus gymnonotus* (Chiroptera: Mormoopidae). *Mammalian Species*, v.52, p. 40-48, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mspecies/seaa003>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- PECK, S. B.; RUIZ-BALIÚ, A. E.; GONZÁLEZ, G. F. G. The cave inhabiting beetles of Cuba (Insecta: Coleoptera): diversity, distribution and ecology. *Journal of Caves and Karst Studies*, v. 60, n. 3, p. 156-165, 1998.
- PHELPS, K.; JOSE, R.; LABONITE, M.; KINGSTON, T. Correlates of cave-roosting bat diversity as an effective tool to identify priority caves. *Biological Conservation*, v. 201, p. 201-209, 2016.

- PIMENTEL, N. T.; ROCHA, P. A.; PEDROSO, M. A.; BERNARD, E. *Estimates of insect consumption and guano input in bat caves in Brazil. Mammal Research*, v. 67, n. 10, p. 355-366, 2022.
- RIVERA-MARCHAND, B.; RODRÍGUEZ-DURÁN, A. Preliminary observations on the renal adaptations of bats roosting in hot caves in Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, v. 37, p. 272-274, 2001.
- ROCHA, P. A. *Quiróptero fauna cavernícola: composição, estrutura de comunidade, distribuição geográfica*. 2013. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.
- RODRIGUES, E.; TEXEIRA, J. M.; TEICHRIEB, V.; BERNARD, E. 2016. Multi-objective Tracking Applied to Bat Populations. In: XVIII SYMPOSIUM ON VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY (SVR), 2016, Gramado. *Anais do Congresso*, Gramado, 2016, p. 155.
- RODRIGUEZ-DURÁN, A. Nonrandom aggregations and distribution of cave-dwelling bats in Puerto Rico. *Journal of Mammalogy*, v. 79, n. 1, p. 141-146, 1998.
- RODRÍGUEZ-DURÁN, A. Bat assemblages in the West Indies: the role of caves. In: FLEMING, T. H.; RACEY, P. A. (Eds). *Island bats: evolution, ecology and conservation*. Chicago: University of Chicago Press, 2009. p. 265-280.
- SIKES, R. S.; TRACY, A. T., JOHN, A. B. II American Society of Mammalogists: levantando os padrões para supervisão ética e apropriada da pesquisa da vida selvagem. , v. 100, n. 3, p. 763-773, 2019.
- STEPANIAN, P. M.; WAINWRIGHT, C. E. Ongoing changes in migration phenology and winter residency at Bracken Bat Cave. *Global Change Biology*, v. 24, n. 7, p. 3266-3275, 2018.
- TAVARES, V. C. Morcegos. In: MARTINS, F. D *et al.* (Eds.). *Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres*. São Paulo: Nitro Imagens, 2012. p. 162-179.
- TEJEDOR, A.; TAVARES, V. C.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, D. New records of hot cave bats from Cuba and the Dominican Republic. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, v. 39, p. 10-15, 2005.
- TORRES, D. F.; BICHUETTE, M. E. Morcegos cavernícolas depositados na Coleção Científica do Laboratório de Estudos Subterrâneos, UFSCar. *Espeleo -Tema*, v.29, n.1, p. 105-119, 2019.
- 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. *Protecting caves for the bats or bats for the caves? Chiroptera Neotropical*, v. 1, n. 2, p. 19-21, 1995.
- VARGAS-MENA, J. C.; CORDERO-SCHMIDT, E.; BENTO, D. M., RODRIGUEZ-HERRERA, B.; MEDELLÍN, R. A.; VENTICINQUE, E. M. *Diversity of cave bats in the Brazilian tropical dry forest of Rio Grande do Norte state. Mastozoologia Neotropical*, v. 25, p. 199-212, 2018.

DO CONHECIMENTO ECOLÓGICO ÀS POLÍTICAS DE CONSERVAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE FATORES QUE INFLUENCIAM A BIODIVERSIDADE FRENTE À AVALIAÇÃO DE PRIORIDADES PARA A CONSERVAÇÃO

FROM ECOLOGICAL KNOWLEDGE TO CONSERVATION POLICIES: A CASE STUDY ON FACTORS INFLUENCING BIODIVERSITY IN THE ASSESSMENT OF CONSERVATION PRIORITIES

Lucas Mendes Rabelo

Universidade Federal de Lavras Centro
de Estudo em Biologia Subterrânea
E-mail: lucasmrabelo@gmail.com

Rodrigo Lopes Ferreira

Universidade Federal de Lavras Centro
de Estudo em Biologia Subterrânea
E-mail: drops@ufla.br

RESUMO

As cavernas se desenvolvem em áreas de frequente uso antrópico, seja para atividades agropastoris, urbanização ou extração mineral. Essas atividades geram impactos aos ecossistemas subterrâneos. Por isso, em diversas regiões do mundo, tem-se empregado esforços de conservação ao patrimônio espeleológico. Para isso, elencar as prioridades para o empenho de esforço e dinheiro tem sido um desafio constante, de modo que diversas metodologias têm surgido. Considerando a heterogeneidade ambiental das áreas nas quais as cavernas neotropicais se desenvolvem, observa-se a

ABSTRACT

Caves develop in areas that are frequently used by humans, whether for farming, urbanization or mineral extraction. These activities have an impact on subterranean ecosystems. For this reason, efforts have been made in various regions of the world to preserve the speleological heritage. To this end, identifying priorities for the commitment of effort and money has been a constant challenge, and various methodologies have emerged. Considering the environmental heterogeneity of the areas in which Neotropical caves are found, there is a need to understand the impact of this heterogeneity on conservation priority

necessidade de entender o impacto dessa heterogeneidade nas avaliações de prioridades para conservação. Sendo assim, o presente estudo avaliou três atributos, já conhecidos por influenciarem aspectos ecológicos dos ecossistemas subterrâneos, no direcionamento de cavernas prioritárias para conservação. Utilizando-se dados de 249 cavernas do sudeste brasileiro, testou-se a influência da litologia, dos biomas e das ecorregiões nos resultados do Cave Vulnerability index modificado, índice já indicado como mais adequado para cavernas de regiões megadiversas. Observou-se que a não consideração desses atributos para elencar as prioridades para conservação tende a selecionar cavernas que compartilham mesma litologia, bioma e ecorregião. Por outro lado, considerar os atributos de relevância ecológica na análise, agrega representatividade para cada um dos atributos dentre as cavernas prioritárias. As cavernas prioritárias obtidas sem considerar os atributos de relevância ecológica se mantiveram prioritárias ao considerá-los. Isso demonstra que, do ponto de vista biológico, se destacam e merecem atenção redobrada, podendo ser consideradas um ponto de partida dentre as prioritárias, principalmente em cenários de recursos escassos.

PALAVRAS-CHAVE: Bioespeleologia, Caverna, Compensação, Ecologia, Impacto, Índice.

assessments. Therefore, this study evaluated three attributes, already known to influence ecological aspects of subterranean ecosystems, in the targeting of priority caves for conservation. Using data from 249 caves in southeastern Brazil, the influence of lithology, biomes and ecoregions on the results of the modified Cave Vulnerability Index was tested, an index already indicated as more suitable for caves in megadiverse regions. It was observed that not taking these attributes into account when listing conservation priorities tends to select caves that share the same lithology, biome and ecoregion. On the other hand, considering the attributes of ecological relevance in the analysis adds representativeness to each of the attributes among the priority caves. The priority caves obtained without considering the ecological relevance attributes remained priorities when they were considered. This shows that, from a biological point of view, they stand out and deserve extra attention, and can be considered a starting point among the priority caves, especially in scenarios of scarce resources.

KEYWORDS: *Biospeleology, Cave, Compensation, Ecology, Impact, Index.*

INTRODUÇÃO

O crescimento da população humana com suas consequentes demandas por alimento e infraestrutura ocasionam alterações dignas de uma nova época geológica (CRUTZEN, 2002). O Antropoceno, marcado pelas aceleradas mudanças climáticas combinadas à fragmentação de habitats com elevada biodiversidade, apresenta taxas de extinção de 100 a 1000 vezes maiores que o esperado pelas taxas naturais conhecidas (LAURANCE, 2019). Esforços para a conservação têm sido pauta frequente no atual cenário de crescentes distúrbios (NEWMAN, 2019). Dentre as diversas estratégias de conservação, as áreas protegidas se destacam pela relevância na conservação da biodiversidade e pelos benefícios para o bem estar humano (CHAPE *et al.*, 2005; LOVEJOY, 2006). Um dos importantes papéis da ciência na conservação da biodiversidade é o provimento de informações para que as políticas públicas incorporem ações mais assertivas (RANDS *et al.*, 2010).

Em diversas partes do mundo, esforços de conservação têm tido por temática as áreas cársticas (NITZU *et al.*, 2018; OSBORNE, 2019; RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005). Por ocorrerem com frequência em rochas de elevado valor econômico e em áreas favoráveis às atividades agro-pastoris, cavernas estão sob frequentes ameaça (AULER, A S; PILÓ, 2015; BACON, 2007). Esses ambientes contribuem para diversos serviços ecossistêmicos, sendo, por exemplo, abrigos para diversos polinizadores e controladores de pragas (KUNZ *et al.*, 2011). Cavernas resguardam um potencial biotecnológico imensurável para setores farmacêuticos, de biorremediação, entre outros (BLAMONT, 2014; CARVALHO

INTRODUCTION

*Human population growth and its consequent demands for food and infrastructure are causing changes worthy of a new geological epoch (CRUTZEN, 2002). The Anthropocene, is marked by accelerated climate change combined with high biodiversity habitats fragmentation, and presents extinction rates 100 to 1000 times higher than expected by known natural rates (LAURANCE, 2019). Conservation efforts have been a frequent focus in the current scenario of increasing disturbances (NEWMAN, 2019). Among the various conservation strategies, protected areas stand out for their relevance to biodiversity conservation and their benefits for human well-being (CHAPE *et al.*, 2005; LOVEJOY, 2006). One of the important roles of science in biodiversity conservation is to provide information so that public policies can incorporate more assertive actions (RANDS *et al.*, 2010).*

*In various parts of the world, conservation efforts have focused on karst areas (NITZU *et al.*, 2018; OSBORNE, 2019; RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005). Because they often occur in high economic value rocks and in favorable areas to agricultural activities, caves are under frequent threat (AULER, A S; PILÓ, 2015; BACON, 2007). These environments contribute to various ecosystem services, such as shelters for various pollinators and pest controllers (KUNZ *et al.*, 2011). Caves hold immeasurable biotechnological potential for the pharmaceutical and bioremediation sectors, among others (BLAMONT, 2014; CARVALHO GUERRA, 2022; LÉVEILLÉ; DATTA, 2010; MAZINA; EGOROV; HARLAMOVA, 2019; P.J. BOSTON *et al.*, 2001; PAWLOWSKI *et al.*, 2016). They have a close relationship with water and its natural cycle (BIONDIC *et al.*, 2015; MILANOVIC, 2005). In the current scenario of global warming,*

GUERRA, 2022; LÉVEILLÉ; DATTA, 2010; MAZINA; EGOROV; HARLAMOVA, 2019; P.J. BOSTON *et al.*, 2001; PAWLOWSKI *et al.*, 2016). Elas apresentam estreita relação com a água e seu ciclo natural (BIONDIC *et al.*, 2015; MILANOVIC, 2005). No atual cenário de aquecimento global, registros abrigados em seus espeleotemas têm contribuído para o conhecimento do clima. Registros paleoclimáticos têm ajudado a prever modificações de nossos ecossistemas, propiciando o planejamento de ações preventivas para escassez de alimento e extinções de espécies (COLUMBU *et al.*, 2021; LAURITZEN; LUNDBERG, 1999; LECHLEITNER *et al.*, 2018; OSTER *et al.*, 2019).

Além de todas essas importâncias, as cavernas abrigam uma complexa biodiversidade, contendo espécies únicas, com distribuição restrita aos habitats subterrâneos. Essas espécies denominadas troglóbias (SKET, 2008), comumente apresentam elevado grau de endemismo, ocorrendo em uma ou poucas cavernas (CHRISTMAN *et al.*, 2005; CULVER *et al.*, 2003; NITZU *et al.*, 2018). Esse acentuado endemismo traz ameaças de extinção a muitas dessas espécies, sendo, portanto, enquadradas frequentemente em algum grau de ameaça pela proposta de avaliação de espécies ameaçadas da IUCN (IUCN, 2017). Existem diversos métodos estabelecidos na literatura internacional que visam o estabelecimento de prioridades para conservação do patrimônio espeleológico (MAMMOLA, 2018; MAMMOLA *et al.*, 2019). Esses métodos, em geral, consideram as espécies troglóbias e a riqueza de espécies como indicadores de relevância da biodiversidade. No entanto, como demonstrado em estudos com dados empíricos, a adequabilidade desses índices varia de região para região, de acordo com o nível de conheci-

*records housed in their speleothems have contributed to our climate knowledge. Paleoclimatic records have helped to predict changes in our ecosystems, making it possible to plan preventive actions for food shortages and species extinctions (COLUMBU *et al.*, 2021; LAURITZEN; LUNDBERG, 1999; LECHLEITNER *et al.*, 2018; OSTER *et al.*, 2019).*

*In addition to all this importance, caves are home to a complex biodiversity, containing unique species whose distribution is restricted to subterranean habitats. These species, known as troglobites (SKET, 2008), often have a high degree of endemism, occurring in one or a few caves (CHRISTMAN *et al.*, 2005; CULVER *et al.*, 2003; NITZU *et al.*, 2018). This marked endemism brings extinction threats to many of these species. Therefore, they are often classified as being under some degree of threat by the IUCN Red List Categories and Criteria (IUCN, 2017). There are several methods accepted in the international literature aimed at establishing priorities for the conservation of speleological heritage (MAMMOLA, 2018; MAMMOLA *et al.*, 2019). These methods generally consider troglobitic species and species richness as indicators of biodiversity relevance. However, as demonstrated in studies with empirical data, the suitability of these indices varies from region to region, according to the level of knowledge about the species occurrence pattern (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018). In Neotropical regions, for example, the "Cave Vulnerability Index - modified", used by Simões and collaborators (2014), modified from the index proposed by Souza-Silva (2008), proved to be more suitable, since it is applicable to databases that do not consider the spatial distribution of species (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014; SOUZA-SILVA, 2008).*

mento para o padrão de ocorrência das espécies (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018). Em regiões Neotropicais, por exemplo, o “Cave Vulnerability Index – modificado”, utilizado por Simões e colaboradores (2014), modificado a partir do índice proposto por Souza-Silva (2008), se mostrou mais adequado, uma vez que é aplicável a bancos de dados que não consideram a distribuição espacial das espécies (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014; SOUZA-SILVA, 2008).

Sabe-se que cavernas em diferentes litologias, biomas e ecorregiões apresentam riquezas distintas tanto para o total de espécies, quanto para as espécies troglóbias (MENDES RABELO; SOUZA-SILVA; LOPES FERREIRA, 2020; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Entretanto, nenhum dos índices apresentados até o momento, apesar de serem embasados pela riqueza total de espécies e riqueza de espécies troglóbias, abordam a necessidade de considerar os atributos de relevância ecológica citados acima em sua aplicação. Considerando a possibilidade de influência da litologia, dos biomas e das ecorregiões no apontamento de cavernas prioritárias para conservação, o presente estudo testou as seguintes hipóteses: (a) Cavernas que compartilham atributos de relevância ecológica (litologia, bioma e ecorregião) favoráveis à riqueza total e de troglóbios serão privilegiadas no direcionamento de medidas de conservação ao avaliar todas as cavernas em conjunto; (b) Considerar os atributos de relevância ecológica para elencar as prioridades para conservação de cavernas corrige o viés da discrepância natural da riqueza total e de troglóbios, diversificando as características incorporadas dentre as prioridades.

It is known that caves in different lithologies, biomes and ecoregions have different richness for both total species and troglobitic species (MENDES RABELO; SOUZA-SILVA; LOPES FERREIRA, 2020; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). However, none of the indices presented so far, despite being based on total species richness and troglobitic species richness, address the need to consider the attributes of ecological relevance in their application. Considering the possible influence of lithology, biomes and ecoregions in identifying priority caves for conservation, this study tested the following hypotheses: (a) Caves that share ecologically relevant attributes (lithology, biome and ecoregion) favorable to total and troglobitic richness will be privileged in targeting conservation measures when evaluating all caves together; (b) Considering ecologically relevant attributes to list priorities for cave conservation corrects the bias of the natural discrepancy of total and troglobitic richness, diversifying the characteristics incorporated among the priorities.

METODOLOGIA

Área de estudo

No presente estudo foram utilizadas 249 cavernas, distribuídas em 500.250 km² no sudeste brasileiro (Figura 1, Apêndice 1). As cavernas se distribuem pelos biomas Cerrado (196) e Mata Atlântica (53) (MMA, 2006). Devido à grande perda de habitat e ao elevado endemismo de espécies, estes biomas são considerados hotspots mundiais de biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000). Essas cavernas se desenvolvem em quatro tipos litológicos distintos, sendo que 153 cavernas são formadas em rochas carbonáticas, 36 em rochas siliciclásticas, 41 em rochas ferruginosas e 19 em rochas granitoides. Tais cavernas inserem-se em cinco bacias hidrográficas (Rio Doce (13), Rio Grande (22), Rio Jequitinhonha (34), Rio Paraíba do Sul (12) e Rio São Francisco (168)) (SPRH, 2015). Na região de ocorrência de 46 cavernas o clima se caracteriza como tropical com verão seco (As), enquanto 54 cavernas ocorrem em clima tropical com inverno seco (Aw), 2 ocorrem em clima subtropical úmido oceânico, sem estação seca e com verão de temperaturas amenas (Cfb), 82 ocorrem em clima subtropical úmido, marcado por invernos secos e verões quentes (Cwa), por fim, 65 ocorrem em clima subtropical úmido, marcado por invernos secos e verões com temperaturas amenas (Cwb) (ALVARES *et al.*, 2013). A altitude obtida na coordenada que corresponde à entrada principal de cada caverna variou de 262 m a 1419 m acima do nível do mar. O tamanho das cavernas variou de 4 metros (Abrigo da Escarpa e Coruja Branca) a 16 quilômetros de condutos (Lapa Sem Fim).

METHODOLOGY

Study area

*This study used 249 caves, spread over 500,250 km² in southeastern Brazil (Figure 1, Appendix 1). The caves are distributed across the Cerrado (196) and Atlantic Forest (53) biomes (MMA, 2006). Due to the great loss of habitat and the high endemism of species, these biomes are considered world biodiversity hotspots (MYERS *et al.*, 2000). These caves develop in four different lithological types, 153 of which are formed in carbonate rocks, 36 in siliciclastic rocks, 41 in ferruginous rocks and 19 in granitics. The caves are located in five river basins (Rio Doce (13), Rio Grande (22), Rio Jequitinhonha (34), Rio Paraíba do Sul (12) and Rio São Francisco (168)) (SPRH, 2015). In the region where 46 caves occur, the climate is characterized as tropical with a dry summer (As), while 54 caves occur in a tropical climate with a dry winter (Aw), 2 occur in a humid subtropical oceanic climate, without a dry season and with mild summer temperatures (Cfb), 82 occur in a humid subtropical climate with dry winters and hot summers (Cwa), and 65 occur in a humid subtropical climate with dry winters and mild summers (Cwb) (ALVARES *et al.*, 2013). The altitude obtained at the coordinate corresponding to the main entrance of each cave varied from 262 m to 1419 m above sea level. The size of the caves ranged from 4 meters (Abrigo da Escarpa and Coruja Branca) to 16 kilometers of conduits (Lapa Sem Fim).*

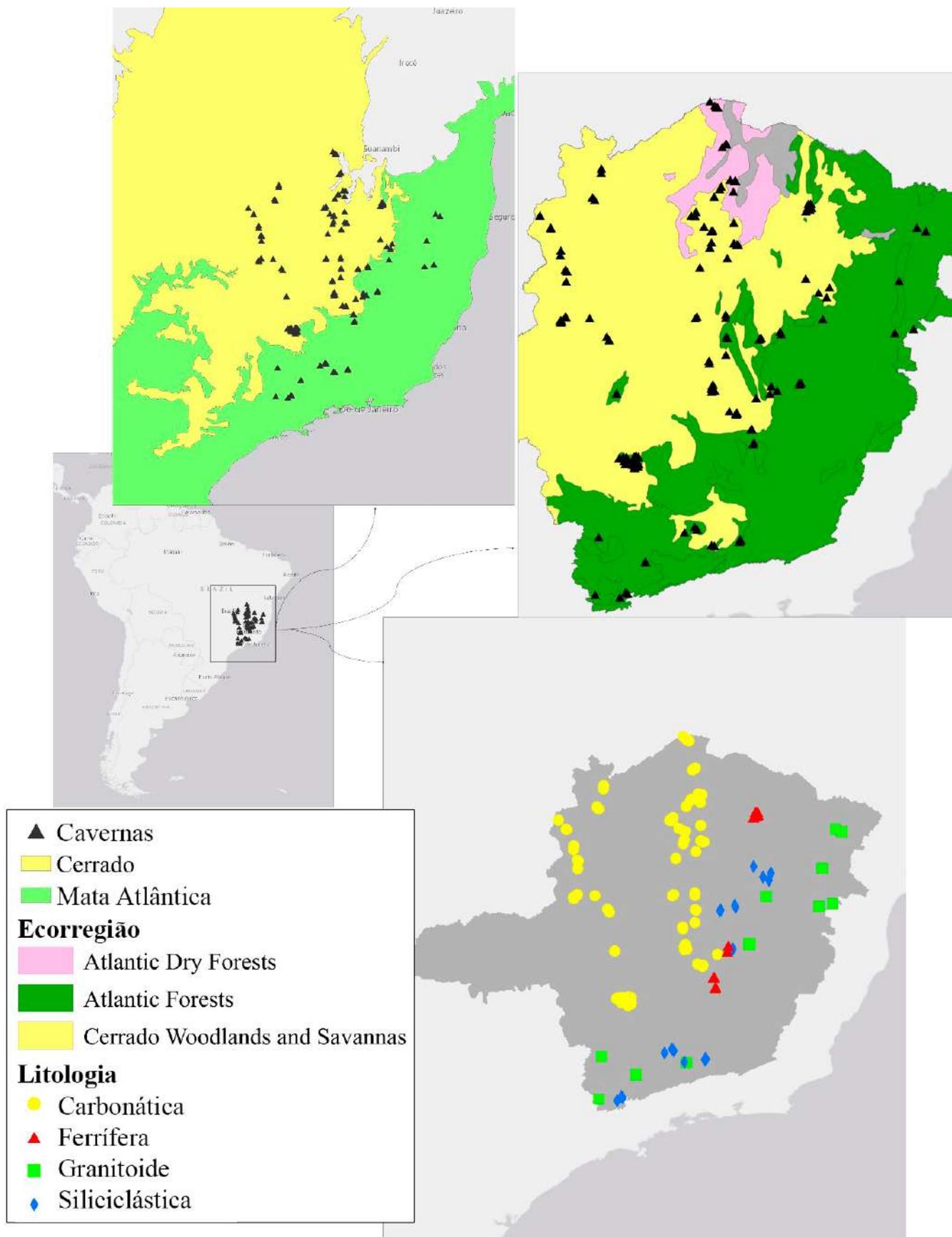


Figura 1 - Mapa de localização das cavernas amostradas onde é possível visualizar a distribuição destas em relação aos biomas, ecorregiões e suas respectivas litologias de ocorrência.

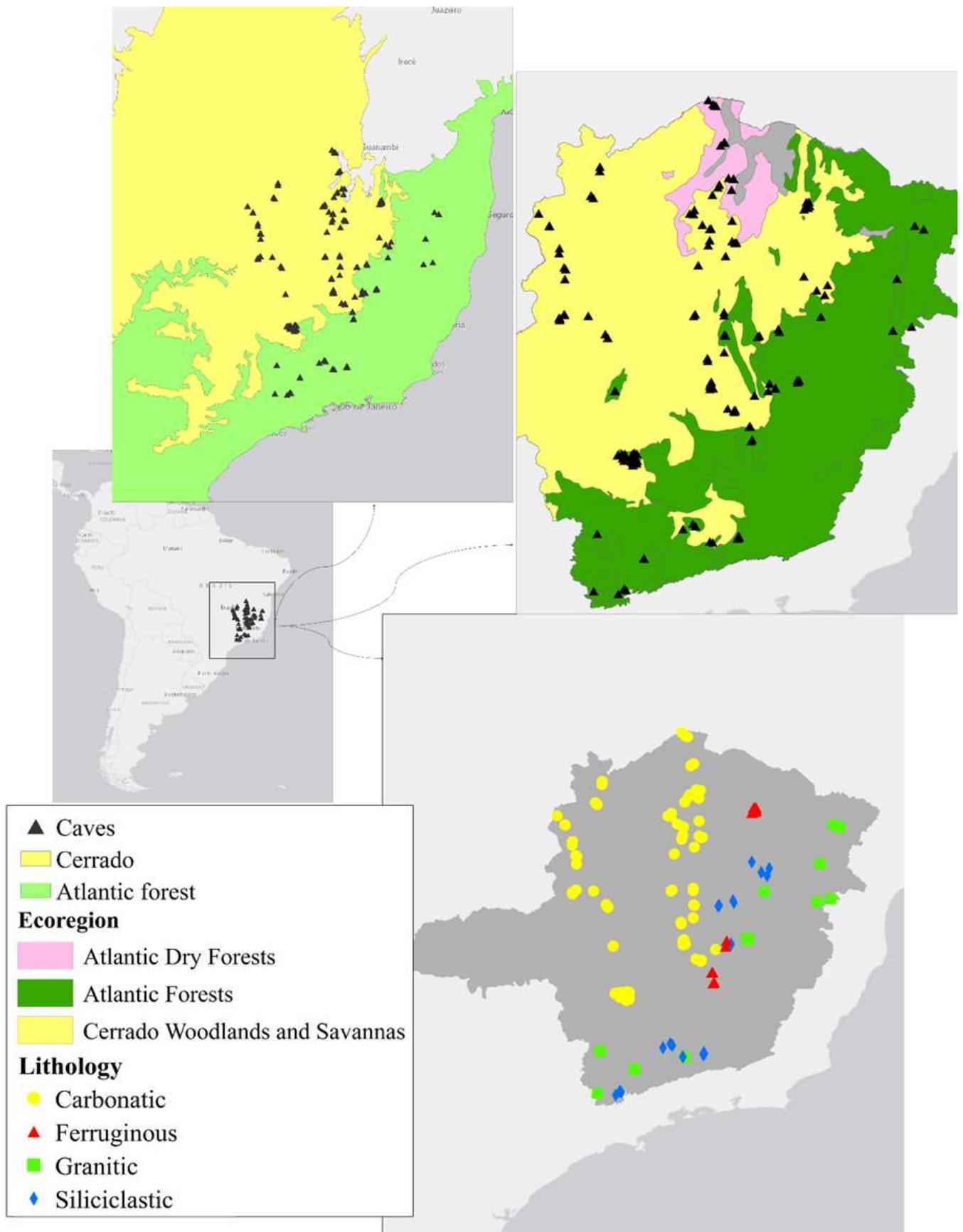


Figure 1 – Sampled caves location map, where their distribution in relation to the biomes, ecoregions and their respective lithologies of occurrence can be seen.

Coleta de dados

Os dados utilizados no presente trabalho foram coletados entre os anos de 2009 e 2018, sendo a amostragem por busca ativa e coleta manual ao longo de toda a extensão acessível das cavernas, esta metodologia é também conhecida internacionalmente como Direct Intuitive Search - DIS (WYNNE *et al.*, 2018). As amostragens foram realizadas por biólogos com ao menos dois anos de experiência em amostragem de fauna subterrânea. As buscas ocorreram por, em média, um minuto por metro quadrado de piso da caverna. O cálculo do esforço amostral foi baseado exclusivamente na área do piso, uma vez que os tetos das cavernas estudadas, em geral, eram inacessíveis e as paredes acessíveis apenas até à altura dos olhos humanos, porção onde era efetiva a busca visual. Para captura dos invertebrados utilizaram-se pinças, pincéis, sugadores e redes de mão. Os invertebrados coletados foram armazenados em potes plásticos contendo álcool na concentração de 70% e encaminhados ao laboratório, onde foram triados, identificados e depositados em coleção científica pública. O material de todos os projetos foi identificado e pareado de modo que, ao final, obteve-se uma listagem única de espécies. A identificação dos grupos: Acari, Amblypygi, Araneae, Coleoptera, Collembola, Dermaptera, Diplopoda, Ephemeroptera, Gastropoda, Hemiptera, Hymenoptera, Isopoda, Isoptera, Neuroptera, Opiliones, Orthoptera, Palpigradi, Psocoptera e Turbellaria contaram com conferência e refinamento taxonômico realizados por especialistas. Invertebrados holometábolos coletados em estágio larval, para os quais adultos pertencentes à família correspondente não tenham sido encontrados na

Data collection

*The data used in this study was collected between 2009 and 2018, sampling by active search and manual collection along the entire accessible length of the caves, this methodology is also known internationally as Direct Intuitive Search - DIS (WYNNE *et al.*, 2018). Sampling was carried out by biologists with at least two years' experience in sampling subterranean fauna. Tweezers, brushes, suckers and hand nets were used to capture the invertebrates. The collected invertebrates were stored in plastic jars containing 70% alcohol and sent to the laboratory, where they were sorted, identified and deposited in a public scientific collection. The material from all the projects was identified and paired so that, in the end, a single list of species was obtained. The identification of the following groups: Acari, Amblypygi, Araneae, Coleoptera, Collembola, Dermaptera, Diplopoda, Ephemeroptera, Gastropoda, Hemiptera, Hymenoptera, Isopoda, Isoptera, Neuroptera, Opiliones, Orthoptera, Palpigradi, Psocoptera and Turbellaria was carried out by specialists. Holometabolous invertebrates collected in the larval stage, for which adults belonging to the corresponding family were not found in the same cave or geographically close caves, were counted as separate species in the total list.*

The physical characteristics of the caves (linear development, number and size of entrances) were measured during the field work using a tape measure or, when topographic maps were available, the measurements shown on them were recorded. Impacts were assessed in two stages. In the first stage on the field, it was possible to observe in detail the anthropogenic alterations near the entrance and inside the caves, making it possible to classify their magnitude and direct

mesma caverna ou cavernas geograficamente próximas, foram contabilizados como espécies distintas na listagem total.

As características físicas das cavernas (desenvolvimento linear, número e tamanho das entradas) foram mensuradas durante os trabalhos de campo com auxílio de trena ou pelas medidas apresentadas nos mapas topográficos, quando disponíveis. Os impactos foram avaliados em dois momentos. No primeiro momento, em campo, foi possível observar em detalhe as alterações antrópicas nas proximidades da entrada e interior das cavidades, permitindo classificar sua magnitude e efeitos diretos. No segundo momento, em laboratório, com auxílio de imagens de satélite foi possível avaliar nos arredores das cavernas (considerando um raio de 250 m) as modificações da paisagem, atividades agropastoris, proximidade de vias de acesso, atividades minerárias e urbanização.

Análises

A fim de averiguar se as cavernas de diferentes litologias, biomas e ecorregiões são realmente distintas quanto à riqueza de espécies, através do teste de Mann-Whitney testaram-se as diferenças entre as médias de cada uma das categorias (MANN, H.B., WHITNEY, 1947).

Para avaliar a influência dos atributos de relevância ecológica nas diretrizes de conservação de cavernas, o presente estudo aplicou o Cave Vulnerability Index – modificado por Simões e colaboradores (2014). Tal índice compreende uma modificação do índice originalmente proposto por Souza-Silva (2008), conhecido como Cave Vulnerability Index (CVI). A modificação foi realizada no método de cálculo da riqueza rela-

effects. Secondly, in the laboratory, with the help of satellite images, it was possible to assess changes to the landscape, farming activities, proximity to access roads, mining activities and urbanization in the vicinity of the caves (considering a 250 m radius).

Analysis

In order to ascertain whether caves from different lithologies, biomes and ecoregions really are different in terms of species richness, the Mann-Whitney test was used to test the differences between each of the categories means (MANN, H.B., WHITNEY, 1947).

In order to assess the influence of ecologically relevant attributes on cave conservation guidelines, this study applied the Cave Vulnerability Index - modified by Simões and collaborators (2014). This index is a modification of the original index proposed by Souza-Silva (2008), known as the Cave Vulnerability Index (CVI). The modification was made to the method of calculating relative richness and biological relevance. Henceforth, this index will

tiva e no cálculo da relevância biológica. Desta forma, daqui por diante tal índice será apresentado como "CVi-m" (Cave Vulnerability Index - modificado). O CVi-m atribui graus de vulnerabilidade às cavernas considerando dados biológicos e impactos antrópicos, o que permite elencar cavernas prioritárias para ações de conservação (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014; SOUZA-SILVA, 2008). O grau de vulnerabilidade resultante do CVi-m é obtido pela sobreposição da relevância biológica com a riqueza de espécies troglóbias e o grau de impacto da caverna. A análise utiliza em todos os critérios a distribuição dos valores em quatro categorias ("Extrema", "Alta", "Média" e "Baixa"). Estas categorias são estabelecidas pela divisão em quatro intervalos iguais do maior valor obtido dentre as cavernas analisadas para o atributo em questão. Para o cálculo da relevância biológica as quatro categorias de riqueza total recebem pesos 8, 6, 4 ou 2, enquanto as categorias de riqueza relativa recebem pesos 4, 3, 2 ou 1. A riqueza relativa é calculada por meio da razão entre a riqueza total, a projeção horizontal da caverna e a extensão das entradas. A relevância biológica é estabelecida pela sobreposição da riqueza total com a riqueza relativa de espécies, onde a soma dos pesos obtidos nessas é dividida em quatro categorias que recebem o peso final 4, 3, 2 ou 1. A riqueza de troglóbios é categorizada também por quatro intervalos iguais com referência no maior valor obtido e soma seus pesos direto à análise final, somando os pesos 4, 3, 2 ou 1 (Apêndice 2). O grau de impacto é calculado com base na soma dos pesos atribuídos aos impactos observados em cada caverna e também recebe os pesos finais 4, 3, 2 ou 1, sendo as categorias também representadas por quatro faixas de mesmo intervalo de valores. Cada impacto é avaliado quanto à sua modificação (depleção,

be presented as "CVi-m" (Cave Vulnerability Index - modified). The CVi-m assigns vulnerability degrees to caves considering biological data and anthropogenic impacts, which allows priority caves to be listed for conservation actions (RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014; SOUZA-SILVA, 2008). The vulnerability degree resulting from CVi-m is obtained by overlaying biological relevance with the richness of troglobitic species and the degree of impact of the cave. For all the criteria, the analysis uses the distribution of values into four categories ("Extreme", "High", "Medium" and "Low"). These categories are established by dividing into four equal intervals the highest value obtained among the caves analyzed for the attribute in question. To calculate biological relevance, the four categories of total richness are given weights of 8, 6, 4 or 2, while the categories of relative richness are given weights of 4, 3, 2 or 1. Relative richness is calculated using the ratio between total richness, the horizontal projection of the cave and the length of the entrances. Biological relevance is established by overlaying total richness with relative species richness, where the sum of the weights obtained in these is divided into four categories that receive the final weight 4, 3, 2 or 1. Troglobitic richness is also categorized by four equal intervals with reference to the highest value obtained and adds their weights directly to the final analysis, adding up to weights 4, 3, 2 or 1 (Appendix 2). The impact degree is calculated based on the sum of the weights assigned to the impacts observed in each cave and also receives the final weights 4, 3, 2 or 1, with the categories also represented by four bands of the same range of values. Each impact is assessed in terms of its modification (depletion, enrichment and alteration), and the modifications are assessed in terms of their potential (intense (weight 2) or slight (weight 1)). Afterwards, the permanence of the impact is assessed (short duration (weight

enriquecimento e alteração), as modificações são avaliadas quanto ao potencial (intenso (peso 2) ou tênue (peso 1)). Posteriormente avalia-se a permanência do impacto (curta duração (peso 1) ou duração contínua (peso 3)) e, em seguida, é avaliado o alcance do impacto (pontual (peso 1) ou sistêmico (peso 2)) (Apêndice 3). Por fim, o grau de vulnerabilidade é atribuído a cada caverna de acordo com a soma obtida para os pesos de relevância biológica, riqueza de troglóbios e grau de impacto (SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014).

Diferentes cenários foram utilizados para a aplicação do índice, de modo que o banco de dados foi fracionado de acordo com as categorias de cada um dos atributos aqui abordados como de relevância ecológica (litologia, bioma e ecorregião). Para comparar as eventuais modificações nas características das cavernas elencadas como de extrema vulnerabilidade pelo índice, aplicaram-se quatro vezes o CVi-m. Na primeira aplicação consideraram-se todas as cavernas (249). Na segunda, as cavernas foram separadas em quatro grupos, de acordo com o atributo litologia (carbonáticas, siliciclásticas, ferruginosas e granitoides). No terceiro recorte as cavernas foram separadas em dois grupos, considerando o atributo bioma (Cerrado e Mata Atlântica). Por último, as cavernas foram separadas em três grupos de acordo com o atributo ecorregião (Atlantic Dry Forests, Atlantic Forests e Cerrado Woodlands and Savannas).

Com relação à seleção de cavernas prioritárias para a conservação, todas aquelas enquadradas como de vulnerabilidade extrema foram consideradas prioritárias para conservação. Para calcular as proporções de conservação da biodiversidade, considerou-se a soma do número de espécies troglóbias e não troglóbias ocorrentes nas cavernas prioritárias dos diferentes cenários.

1) or continuous duration (weight 3)) and then the scope of the impact is assessed (one-off (weight 1) or systemic (weight 2)) (Appendix 3). Finally, the vulnerability degree is assigned to each cave according to the sum obtained for the weights of biological relevance, troglobitic richness and impact degree (SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2014).

The index was applied in different scenarios, so that the database was divided up according to the categories of each of the ecological relevant attributes (lithology, biome and ecoregion). In order to compare any changes in the characteristics of the caves listed as extremely vulnerable by the index, CVi-m was applied four times. In the first application, all the caves (249) were considered. In the second, the caves were separated into four groups according to lithology (carbonate, siliciclastic, ferruginous and granitic). In the third section, the caves were separated into two groups according to their biome (Cerrado and Atlantic Forest). Finally, the caves were separated into three groups according to the ecoregion attribute (Atlantic Dry Forests, Atlantic Forests and Cerrado Woodlands and Savannas).

Regarding to the selection of priority caves for conservation, all those classified as extremely vulnerable were considered priorities. To calculate the proportions of biodiversity conservation, the sum of the number of troglobitic and non-troglobitic species occurring in the priority caves of the different scenarios was considered.

RESULTADOS

Ao todo foram encontradas 4281 espécies de invertebrados distribuídas em 64 Ordens: Acari (Subclasse) (20), Amblypygi (5), Amphipoda (4), Araneae (396), Archaeognatha (4), Astigmata (1), Bivalvia (Classe) (1), Blattodea (41), Coleoptera (714), Collembola (96), Decapoda (1), Dermaptera (14), Diplura (11), Diptera (807), Embioptera (1), Endeostigmata (2), Ephemeroptera (34), Euonychophora (1), Gastropoda (Classe) (66), Geophilomorpha (12), Haplotaxida (64), Harpacticoida (1), Hemiptera (281), Hirudinea (Subclasse) (8), Hydrozoa (Classe) (1), Hymenoptera (345), Isopoda (102), Isoptera (42), Ixodida (13), Lepidoptera (216), Lithobiomorpha (8), Megaloptera (6), Mesostigmata (117), Nematoda (Filo) (2), Nematomorpha (Filo) (1), Neuroptera (27), Odonata (16), Opilioacarida (7), Opiliones (69), Orthoptera (59), Ostracoda (7), Palpigradi (10), Pauropoda (11), Plecoptera (4), Polydesmida (81), Polyxenida (5), Prostigmata (1), Protura (1), Pseudoscorpiones (47), Psocoptera (115), Sarcoptiformes (90), Scolopendromorpha (18), Scorpiones (5), Scutigermorpha (2), Siphonaptera (5), Siphonophorida (5), Spirobolida (22), Spirostreptida (33), Symphyla (3), Thysanoptera (5), Trichoptera (45), Tricladida (35), Trombidiformes (105), Zygentoma (10).

Dentre as espécies encontradas, 190 foram consideradas troglóbias pertencendo às Ordens: Acari (1), Amblypygi (2), Amphipoda (2), Araneae (34), Coleoptera (14), Collembola (13), Hemiptera (2), Hirudinea (Subclasse) (1), Isopoda (45), Opiliones (15), Orthoptera (1), Palpigradi (7), Polydesmida (22), Polyxenida (2), Pseudoscorpiones (5), Scolopendromorpha (9), Spirostreptida (7), Tricladida (6) e Trombidiformes (2).

RESULTS

A total of 4281 invertebrates species were found, distributed in 64 Orders: Acari (Subclass) (20), Amblypygi (5), Amphipoda (4), Araneae (396), Archaeognatha (4), Astigmata (1), Bivalvia (Class) (1), Blattodea (41), Coleoptera (714), Collembola (96), Decapoda (1), Dermaptera (14), Diplura (11), Diptera (807), Embioptera (1), Endeostigmata (2), Ephemeroptera (34), Euonychophora (1), Gastropoda (Class) (66), Geophilomorpha (12), Haplotaxida (64), Harpacticoida (1), Hemiptera (281), Hirudinea (Subclass) (8), Hydrozoa (Class) (1), Hymenoptera (345), Isopoda (102), Isoptera (42), Ixodida (13), Lepidoptera (216), Lithobiomorpha (8), Megaloptera (6), Mesostigmata (117), Nematoda (Phylum) (2), Nematomorpha (Phylum) (1), Neuroptera (27), Odonata (16), Opilioacarida (7), Opiliones (69), Orthoptera (59), Ostracoda (7), Palpigradi (10), Pauropoda (11), Plecoptera (4), Polydesmida (81), Polyxenida (5), Prostigmata (1), Protura (1), Pseudoscorpiones (47), Psocoptera (115), Sarcoptiformes (90), Scolopendromorpha (18), Scorpiones (5), Scutigermorpha (2), Siphonaptera (5), Siphonophorida (5), Spirobolida (22), Spirostreptida (33), Symphyla (3), Thysanoptera (5), Trichoptera (45), Tricladida (35), Trombidiformes (105), Zygentoma (10).

Of the species found, 190 were considered troglobites belonging to the Orders: Acari (1), Amblypygi (2), Amphipoda (2), Araneae (34), Coleoptera (14), Collembola (13), Hemiptera (2), Hirudinea (Subclass) (1), Isopoda (45), Opiliones (15), Orthoptera (1), Palpigradi (7), Polydesmida (22), Polyxenida (2), Pseudoscorpiones (5), Scolopendromorpha (9), Spirostreptida (7), Tricladida (6) and Trombidiformes (2).

A riqueza total observada nas cavernas variou de 10 (Paleotoca 3) a 151 espécies (Lapa Sem Fim). Em relação à riqueza de espécies troglóbias, a maior obtida foi 10 (ocorrendo nas Grutas do Nestor e Lapa d'água (Montes Claros)). A média de riqueza total para as 249 cavernas do estudo foi de 49.96 (SD = 24.92), enquanto a média de riqueza de espécies troglóbias foi de 1.84 (SD = 2.05) (Apêndice 1).

As cavernas carbonáticas apresentaram a maior média para a riqueza total de espécies (58.37 spp. SD = 25.68), seguidas das cavernas graníticas (44.74 spp. SD = 15.52), siliciclásticas (37.25 spp. SD = 16.45) e por fim das ferruginosas (32.2 spp. SD = 15.74). As cavernas carbonáticas apresentaram média de riqueza total significativamente maiores que de todas as demais litologias (Mann-Whitney test $p = 0.021$). As cavernas granitoides também apresentaram média significativamente maior que as ferruginosas (Mann-Whitney test $p = 0.003$) (Apêndice 1, Figura 2 A).

Em relação às espécies troglóbias, mais uma vez as cavernas carbonáticas se destacaram, apresentando, em média, 2.39 espécies por caverna (SD = 2.23), sendo esta significativamente maior que as médias apresentadas para cada uma das demais litologias (Mann-Whitney test $p = 0.016$). A segunda maior média obtida para a riqueza de espécies troglóbias ocorreu nas cavernas ferruginosas (1.44 spp. SD = 1.46), sendo esta significativamente maior que a apresentada pelas cavernas siliciclásticas, que apresentaram a menor riqueza média (0.5 spp. SD = 0.94) (Mann-Whitney test $p < 0.001$). As cavernas granitoides apresentaram a segunda menor média para a riqueza de espécies troglóbias (0.79 spp. SD = 1.23), entretanto, esta não se mostrou significativamente distinta das médias apresentadas pelas cavernas ferruginosas e siliciclásticas.

The total richness observed in the caves ranged from 10 (Paleotoca 3) to 151 species (Lapa Sem Fim). With regard to troglobitic species richness, the highest obtained was 10 (occurring in Grutas do Nestor and Lapa d'água (Montes Claros)). The average total richness for the 249 caves in the study was 49.96 (SD = 24.92), while the average richness of troglobitic species was 1.84 (SD = 2.05) (Appendix 1).

Carbonate caves had the highest average total species richness (58.37 spp. SD = 25.68), followed by granitic caves (44.74 spp. SD = 15.52), siliciclastic caves (37.25 spp. SD = 16.45) and finally ferruginous caves (32.2 spp. SD = 15.74). The carbonate caves had significantly higher average total richness than all the other lithologies (Mann-Whitney test $p = 0.021$). The granitic caves also had a significantly higher average than the ferruginous caves (Mann-Whitney test $p = 0.003$) (Appendix 1, Figure 2 A).

In terms of troglobitic species, once again the carbonate caves stood out, with an average of 2.39 species per cave (SD = 2.23), which was significantly higher than the averages for each of the other lithologies (Mann-Whitney test $p = 0.016$). The second highest average for troglobitic species richness was found in the ferruginous caves (1.44 spp. SD = 1.46), which was significantly higher than that found in the siliciclastic caves, which had the lowest average richness (0.5 spp. SD = 0.94) (Mann-Whitney test $p < 0.001$). The granitic caves had the second lowest average for troglobitic species richness (0.79 spp. SD = 1.23), but this was not significantly different from the averages presented by the ferruginous and siliciclastic caves. The occurrence of troglobitic species was more frequent in carbonate rocks, being detected in 77.8% of the caves. Caves in ferruginous rocks

A ocorrência de espécies troglóbias foi mais frequente em rochas carbonáticas, sendo detectada em 77.8% das cavernas. As cavernas em rochas ferruginosas apresentaram a segunda maior frequência de ocorrência (63.4%). Já as cavernas granitoides e siliciclásticas foram as que obtiveram menor frequência na ocorrência de espécies troglóbias (47.4% e 30.5% respectivamente) (Apêndice 1, Figura 2 D).

Em relação aos biomas, as cavernas do Cerrado apresentaram riqueza total média de 52.62 spp. (SD = 26) e riqueza de troglóbios média de 2.17 spp. (SD = 2.11). Já as cavernas de Mata Atlântica, apresentaram 40.15 spp. (SD = 17.42) em média para a riqueza total e 0.6 spp. (SD = 1.11) em média para a riqueza de troglóbios. O Cerrado apresentou médias significativamente maiores que a Mata Atlântica tanto para a riqueza total, quanto para a riqueza de troglóbios (Mann-Whitney test $p < 0.001$) (Figura 2 B, Figura 2 E).

Ao considerar os agrupamentos por ecorregiões observou-se que as médias de riqueza total das cavernas não apresentaram diferenças significativas. As cavernas da ecorregião Atlantic Dry Forests apresentaram, em média, 47.62 spp. (SD = 25.52), as ocorrentes em Atlantic Forests apresentaram, em média, 45.81 spp. (SD = 17.45) e as ocorrentes em Cerrado Woodlands and Savannas apresentaram, em média, 52.42 spp. (SD = 27.9) (Figura 2 C). Já considerando a riqueza de troglóbios, as cavernas ocorrentes na ecorregião Atlantic Dry Forests (3.06 SD = 2.72) apresentam média significativamente maior que as ocorrentes em Atlantic Forest (1.67 SD = 1.94) (Mann-Whitney test $p = 0.04$) e Cerrado Woodlands and Savannas (1.8 SD = 1.99) (Mann-Whitney test $p < 0.02$) (Figura 2 F).

had the second highest frequency of occurrence (63.4%). Granitic and siliciclastic caves had the lowest frequency of troglobitic species (47.4% and 30.5% respectively) (Appendix 1, Figure 2 D).

In relation to the biomes, the Cerrado caves had an average total richness of 52.62 spp. (SD = 26) and an average troglobitic richness of 2.17 spp. (SD = 2.11). The Atlantic Forest caves, on the other hand, had an average of 40.15 spp. (SD = 17.42) for total richness and 0.6 spp. (SD = 1.11) for troglobitic richness. The Cerrado biome had significantly higher averages than the Atlantic Forest for both total richness and troglobitic richness (Mann-Whitney test $p < 0.001$) (Figure 2 B, Figure 2 E).

When considering the groupings by ecoregion, it was observed that the average total richness of the caves did not differ significantly. The caves in the Atlantic Dry Forests ecoregion had an average of 47.62 spp. (SD = 25.52), those in the Atlantic Forests had an average of 45.81 spp. (SD = 17.45) and those in the Cerrado Woodlands and Savannas had an average of 52.42 spp. (SD = 27.9) (Figure 2 C). In terms of troglobitic richness, the caves in the Atlantic Dry Forests ecoregion (3.06 SD = 2.72) had a significantly higher average than those in the Atlantic Forest (1.67 SD = 1.94) (Mann-Whitney test $p = 0.04$) and Cerrado Woodlands and Savannas (1.8 SD = 1.99) (Mann-Whitney test $p < 0.02$) (Figure 2 F).

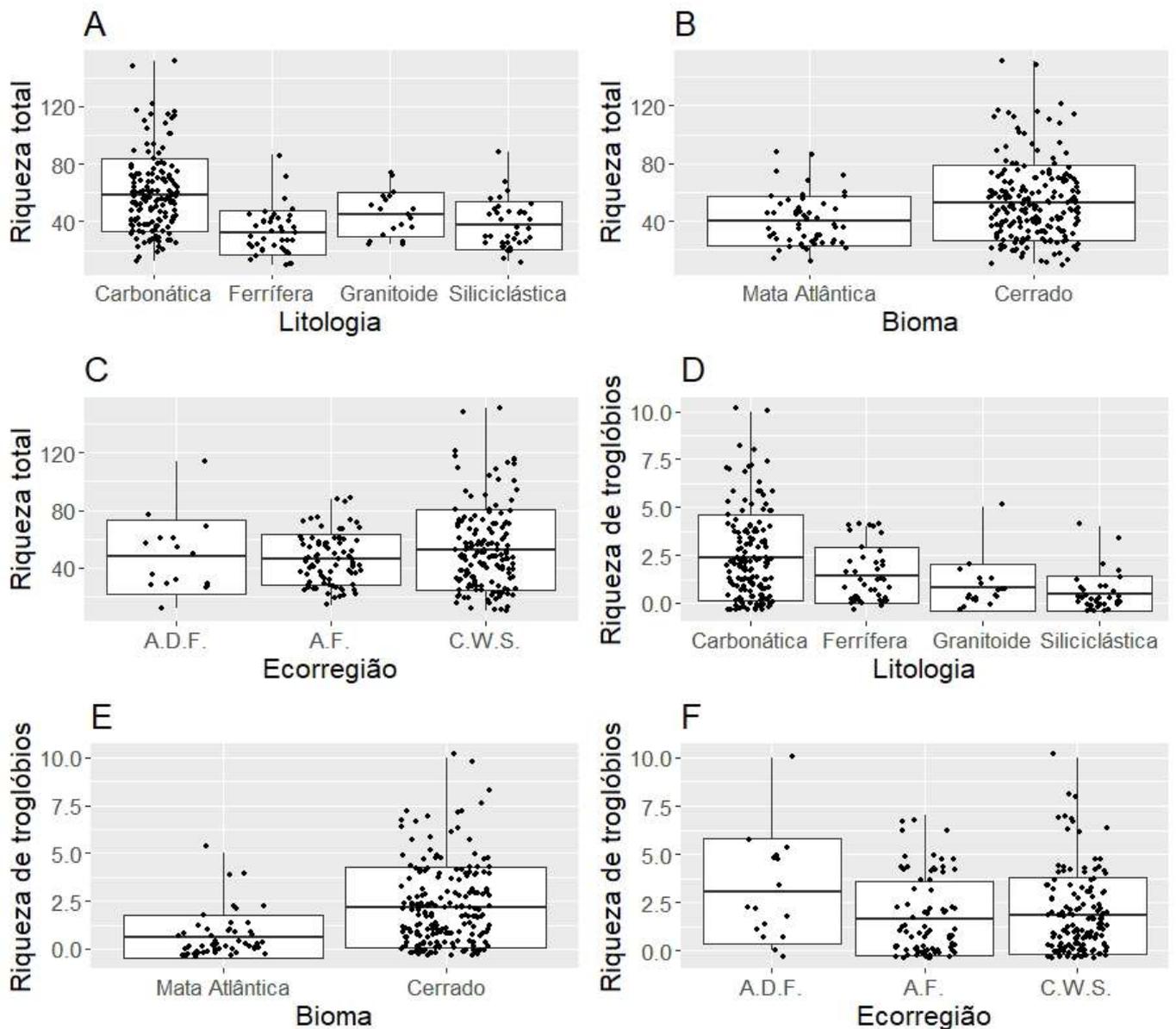


Figura 2 – Boxplots apresentando: A) Variação da riqueza total das 249 cavernas agrupadas em suas respectivas litologias; B) Variação da riqueza total obtida para as 249 cavernas agrupadas em seus respectivos Biomas; C) Variação da riqueza total obtida para as cavernas ocorrentes nas ecorregiões Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) e Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.); D) Variação da riqueza de troglóbios das 249 cavernas agrupadas em suas respectivas litologias; E) Variação da riqueza de troglóbios obtida para as 249 cavernas agrupadas em seus respectivos Biomas; F) Variação da riqueza de troglóbios obtida para as cavernas ocorrentes nas ecorregiões Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) e Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.).

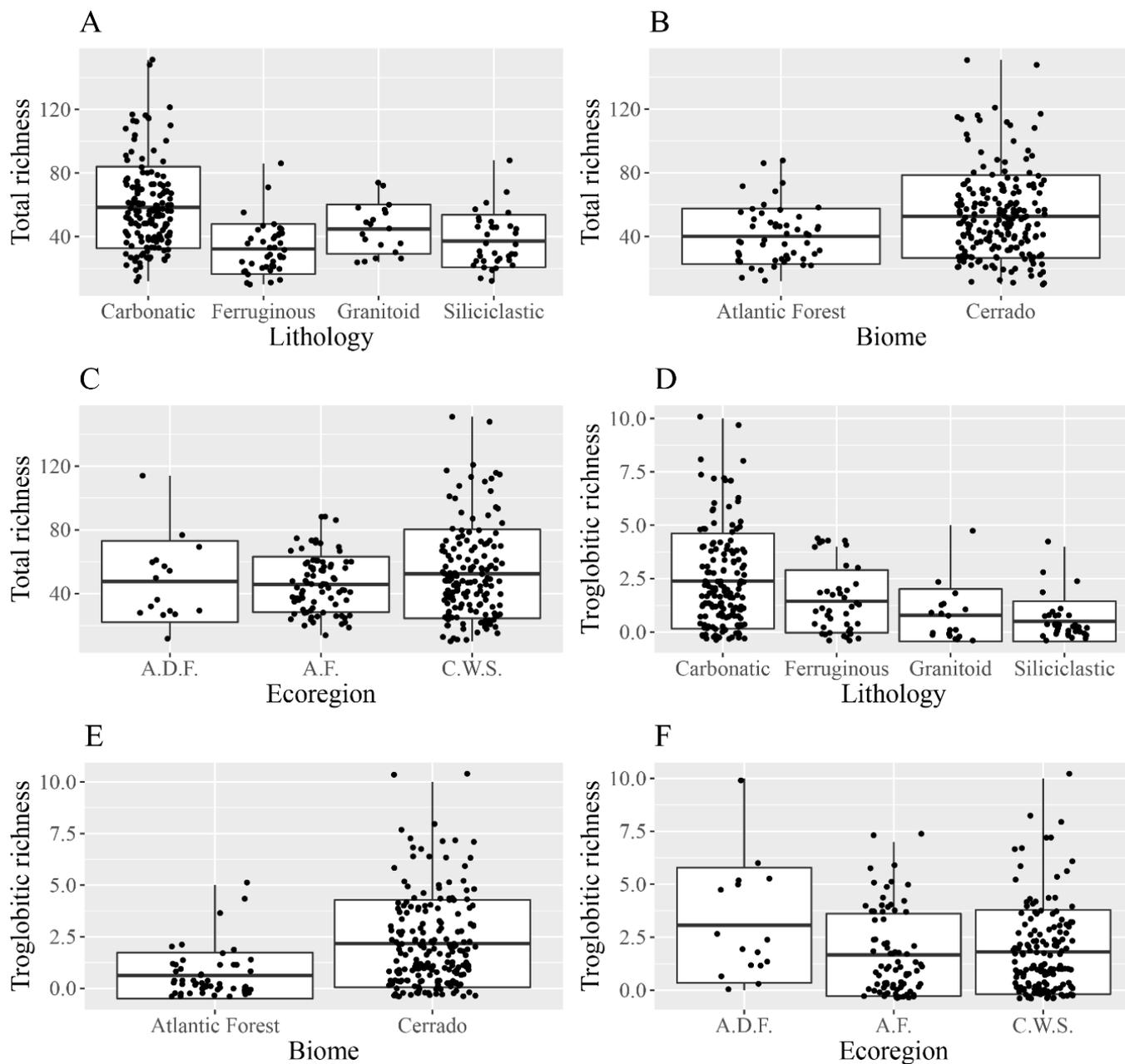


Figure 2 – Boxplots showing: A) Variation in the total richness of the 249 caves grouped into their respective lithologies; B) Variation in the total richness obtained for the 249 caves grouped into their respective Biomes; C) Variation in the total richness obtained for the caves occurring in the Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) and Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.) ecoregions. ; D) Variation in troglobitic richness of the 249 caves grouped into their respective lithologies; E) Variation in troglobitic richness obtained for the 249 caves grouped into their respective Biomes; F) Variation in troglobitic richness obtained for the caves occurring in the Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) and Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.) ecoregions.

Impactos encontrados



Observed impacts

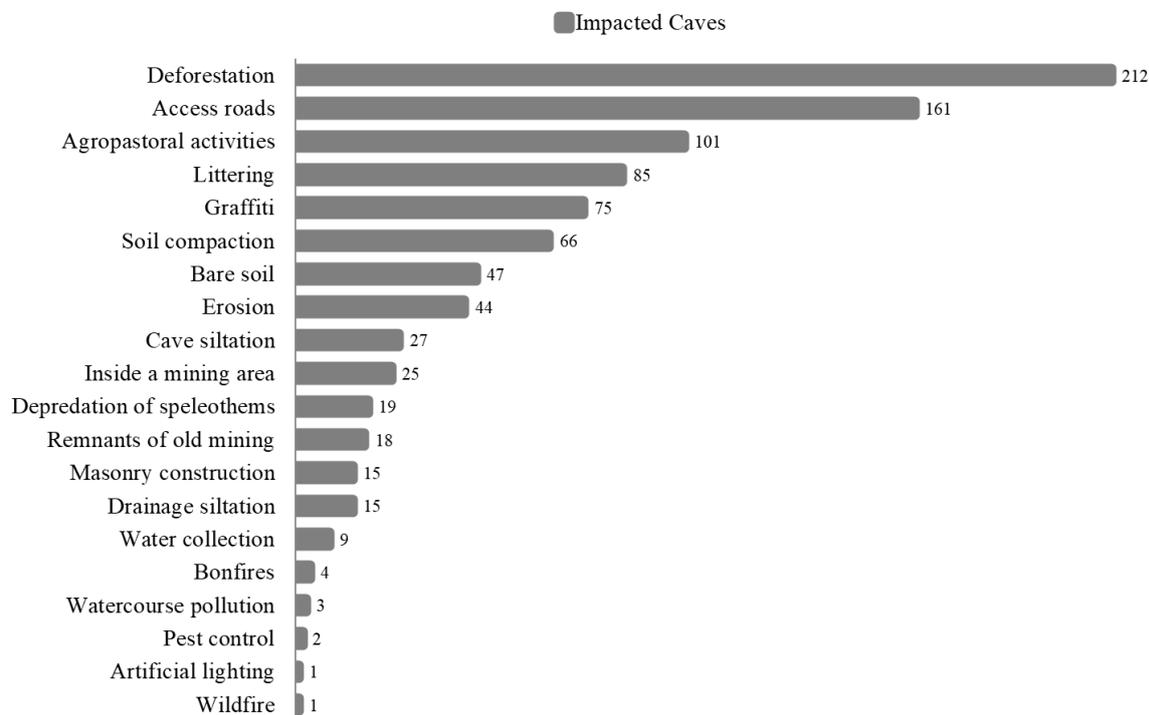


Figura 3 – Impactos observados no estudo e suas respectivas frequências de ocorrência (números a frente de cada barra representam o número de cavernas nas quais o impacto foi observado).

Figure 3 – Observed impacts and their respective occurrence frequencies (numbers in front of each bar represent the number of caves in which the impact was observed)..

Os impactos mais frequentes foram: desmatamento (212 caves), vias de acesso (161 caves), atividades agropastoris (101 caves), lixo (85 caves) e pichação (75 caves) (Figura 3). Ao avaliar a frequência na ocorrência desses impactos para os diferentes cenários, observou-se que existem variações nas proporções dos impactos tanto para litologias, quanto para biomas e ecorregiões. Considerando apenas as cavernas carbonáticas, os impactos mais recorrentes foram desmatamento (94.1%), vias de acesso (54.9%), atividades agropastoris (51%), lixo (47.1%), pichação (43.1%) e compactação do solo (34.6%). Para as cavernas siliciclásticas os impactos mais frequentes foram vias de acesso (77.8%), desmatamento (61.1%), compactação do solo (30.6%), atividades agropastoris (19.4%), lixo (19.4%) e pichação (11.1%). Nas cavernas ferruginosas os impactos mais frequentes foram: vias de acesso (82.9%), desmatamento (68.3%), processo erosivo (41.5%), solo desnudo (39%), em área de mineração (36.6%) e atividades agropastoris (17.1%). Por fim, os impactos mais frequentes nas cavernas graníticas foram desmatamento (94.7%), vias de acesso (78.9%), atividades agropastoris (47.4%), lixo (31.6%), assoreamento da caverna (26.3%) e pichação (21.1%) (Figura 4).

The most frequent impacts were: deforestation (212 caves), access roads (161 caves), agropastoral activities (101 caves), littering (85 caves) and graffiti (75 caves) (Figure 3). When evaluating the frequency of occurrence of these impacts for the different scenarios, it was observed that there are variations in the proportions of impacts both for lithologies and for biomes and ecoregions. Considering only the carbonate caves, the most recurrent impacts were deforestation (94.1%), access roads (54.9%), agropastoral activities (51%), littering (47.1%), graffiti (43.1%) and soil compaction (34.6%). For siliciclastic caves, the most frequent impacts were access roads (77.8%), deforestation (61.1%), soil compaction (30.6%), agropastoral activities (19.4%), littering (19.4%) and graffiti (11.1%). In the ferruginous caves, the most frequent impacts were: access roads (82.9%), deforestation (68.3%), erosion (41.5%), bare soil (39%), inside a mining area (36.6%) and farming activities (17.1%). Finally, the most frequent impacts on granitic caves were deforestation (94.7%), access roads (78.9%), agropastoral activities (47.4%), littering (31.6%), cave siltation (26.3%) and graffiti (21.1%) (Figure 4).

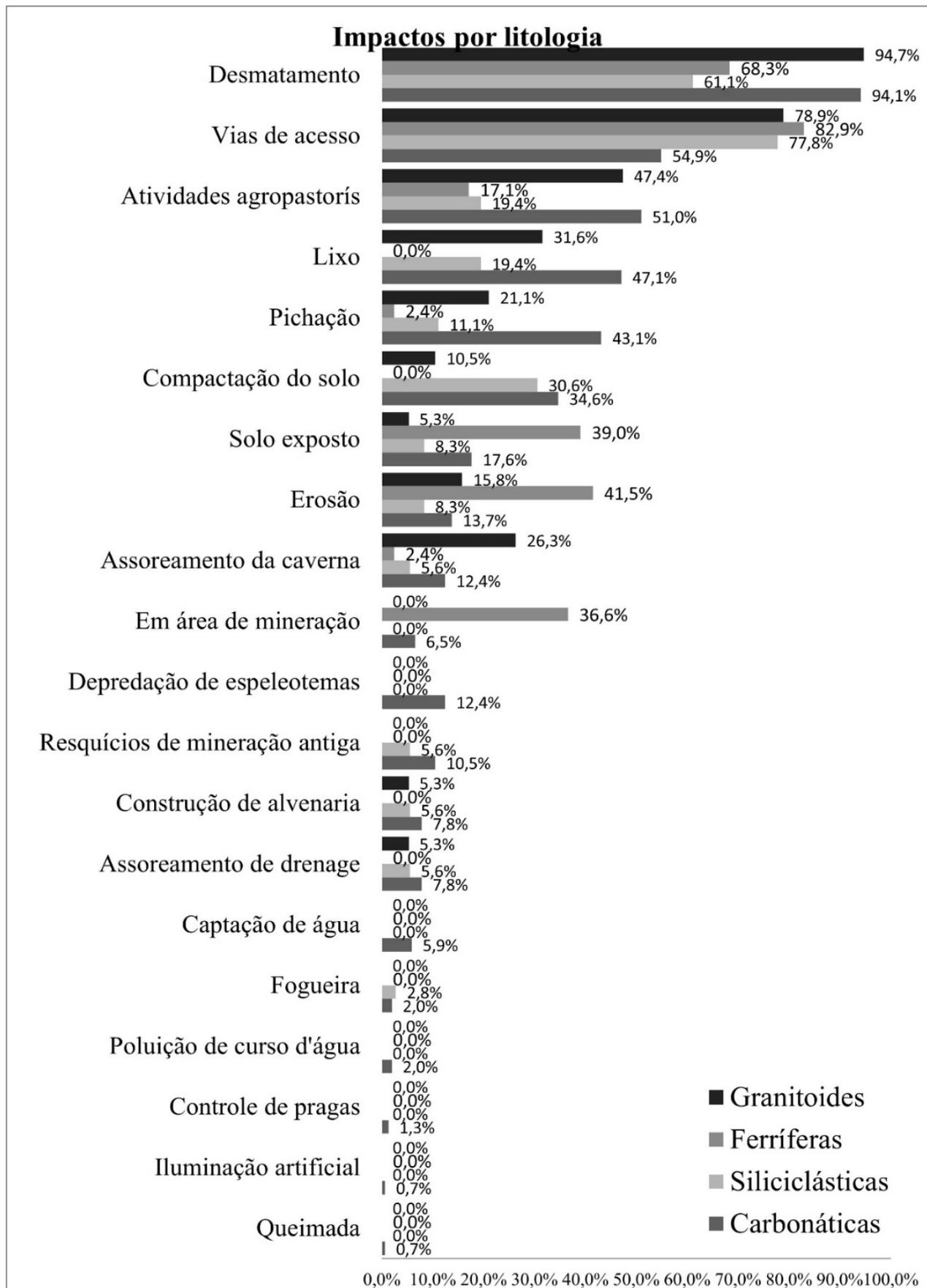


Figura 4 - Gráfico de barras ilustrando a frequência dos impactos registrados em cavernas de cada uma das litologias.

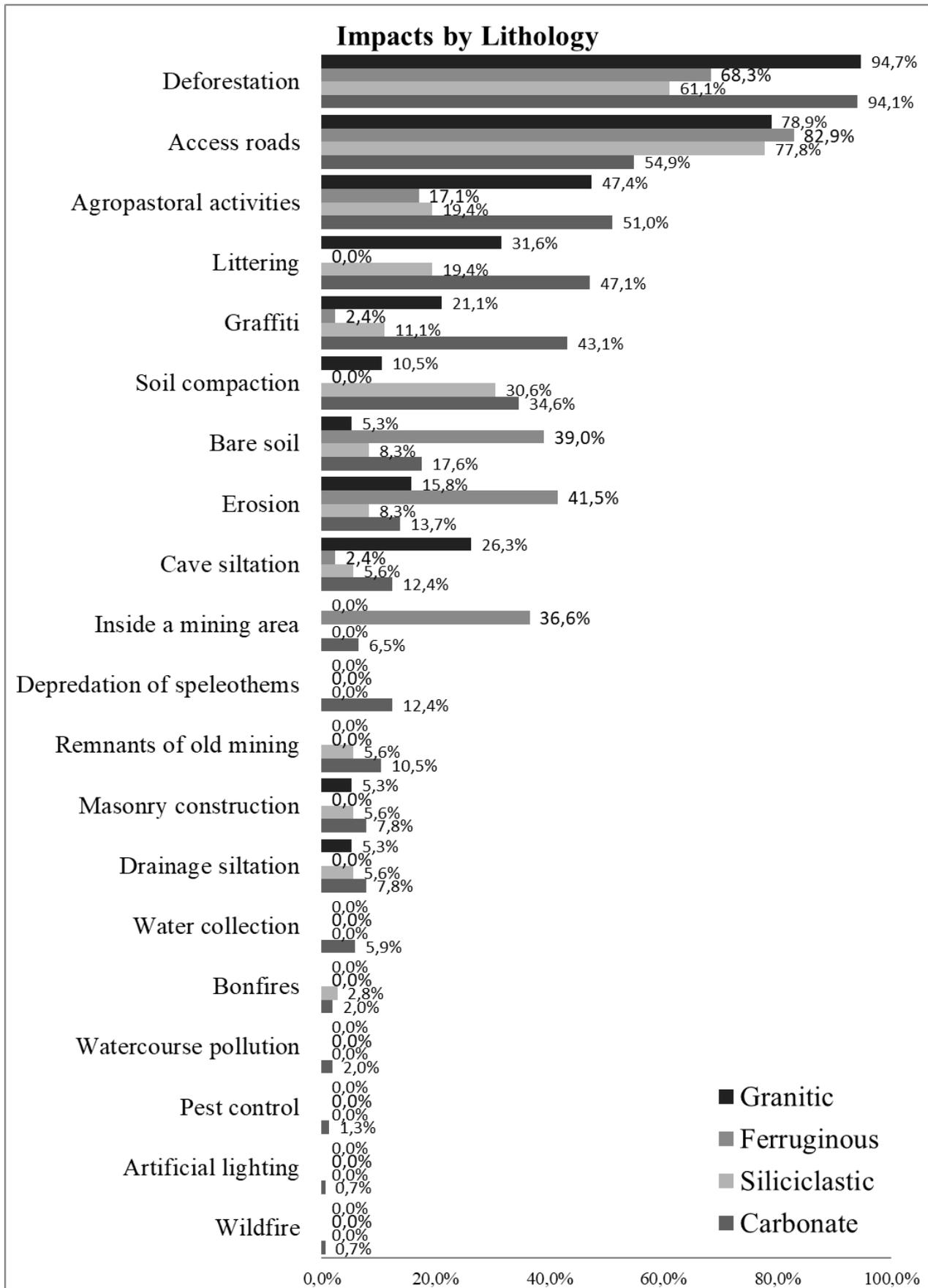


Figure 4 - Bar graph illustrating the frequency of impacts recorded in caves for each lithology.

Para as cavernas que ocorrem no bioma Cerrado, desmatamento foi o impacto mais frequente, ocorrendo em 89.8% das cavernas, seguido por vias de acesso (61,22%), atividades agropastoris (45.41%), lixo (38.78%), pichação (35.71%), compactação do solo (28.06%), solo desnudo (22.96%), erosão (19.9%) e em área de mineração (12.76%). Nas cavernas ocorrentes em Mata Atlântica, vias de acesso (77.36%) e desmatamento (67.92%) se alternam com relação ao Cerrado, mas continuam nas posições de maior frequência, seguidas por atividades agropastoris (22.64%), compactação do solo (20.75%), lixo (16.98%) e assoreamento (13.21%) (Figura 5).

For caves in the Cerrado biome, deforestation was the most frequent impact, occurring in 89.8% of the caves, followed by access roads (61.22%), agropastoral activities (45.41%), littering (38.78%), graffiti (35.71%), soil compaction (28.06%), bare soil (22.96%), erosion (19.9%) and mining (12.76%). In the caves that occur in the Atlantic Forest, access roads (77.36%) and deforestation (67.92%) alternate in relation to the Cerrado, but remain in the most frequent positions, followed by agropastoral activities (22.64%), soil compaction (20.75%), garbage (16.98%) and cave siltation (13.21%) (Figure 5).

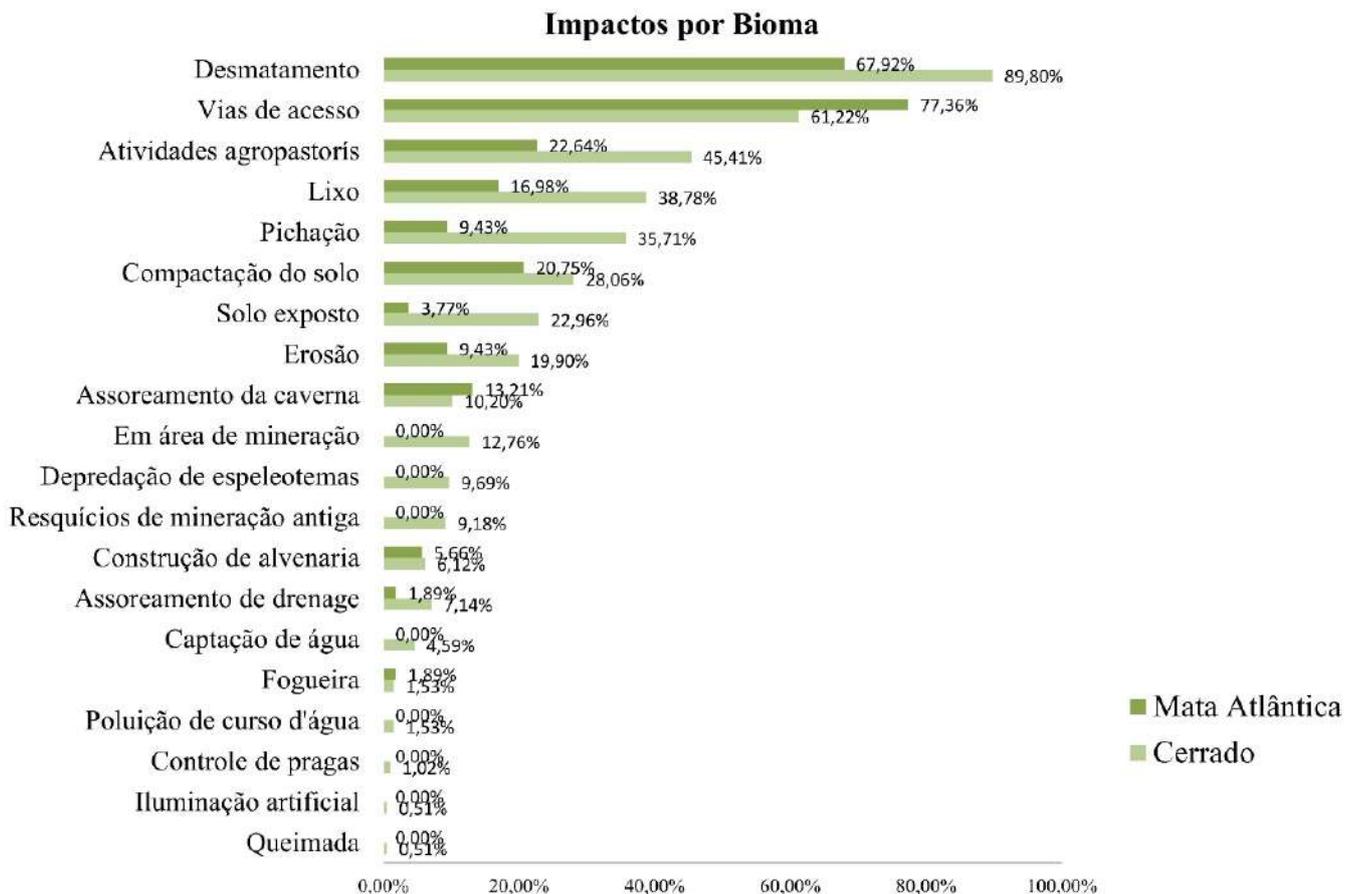


Figura 5 – Gráfico ilustrando a frequência dos impactos observados em cavernas ocorrentes nos Biomas Cerrado e Mata Atlântica.

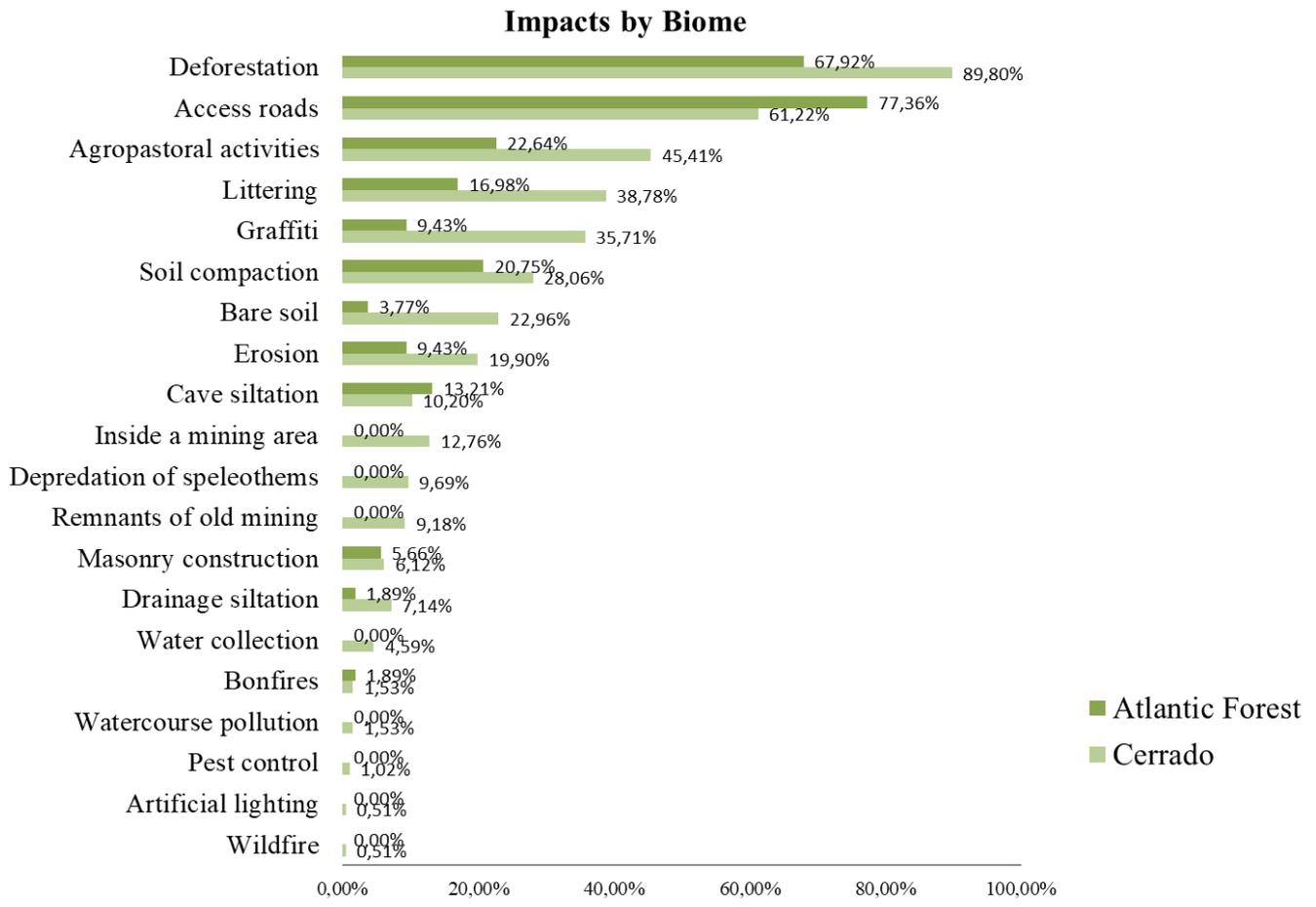


Figure 5 – Bar graph illustrating the frequency of impacts observed in caves in the Cerrado and Atlantic Forest Biomes.

Analisando os impactos em relação às ecorregiões, obteve-se que na ecorregião Atlantic Dry Forests o impacto desmatamento ocorreu em todas as cavernas, enquanto atividades agropastoris e lixo ocorreram em 81.25% das cavernas, pichação em 62.5%, resquícios de mineração em 50% e vias de acesso em 43.75% das cavernas. Na ecorregião Atlantic Forests mais uma vez os impactos mais frequentes foram desmatamento (79.01%) e vias de acesso (65.43%), seguidos lixo (29.63%), compactação do solo (27.16%), pichação (25.93%) e atividades agropastoris (24.69%). Por último, na ecorregião Cerrado Woodlands and Savannas, que apresentou a maior ocorrência de cavernas no estudo, obteve-se novamente desmatamento (86.84%) e

Analyzing the impacts in relation to the ecoregions, we found that in the Atlantic Dry Forests ecoregion the impact of deforestation occurred in all the caves, while agropastoral activities and littering occurred in 81.25% of the caves, graffiti in 62.5%, Remnants of old mining in 50% and access roads in 43.75%. In the Atlantic Forests ecoregion, once again the most frequent impacts were deforestation (79.01%) and access roads (65.43%), followed by littering (29.63%), soil compaction (27.16%), graffiti (25.93%) and agropastoral activities (24.69%). Finally, in the Cerrado Woodlands and Savannas ecoregion, which had the highest cave occurrence of the studied area, deforestation (86.84%) and access roads (66.45%) were once again the main impacts, followed by agropas-

vias de acesso (66.45%) como os impactos de destaque, seguidos por atividades agropastoris (44.74%), lixo (31.58%), pichação (28.95%) e solo desnudo (25.66%) (Figura 6).

total activities (44.74%), littering (31.58%), graffiti (28.95%) and bare soil (25.66%) (Figure 6).



Figura 6 – Gráfico ilustrando a frequência dos impactos observados em cavernas ocorrentes nas ecorregiões Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) and Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.).

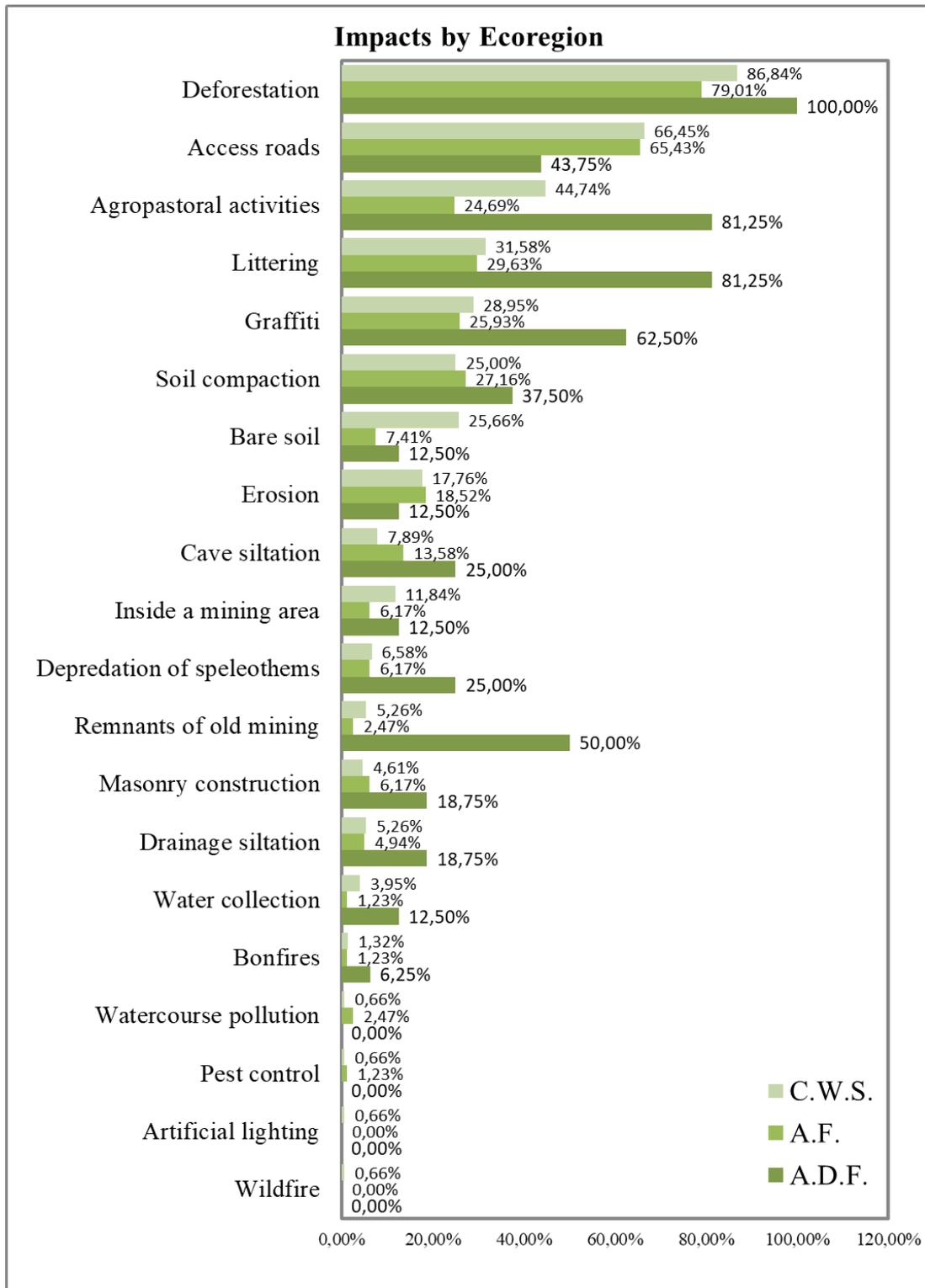


Figure 6 – Bar graph illustrating the impacts frequency observed in caves located in the Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) and Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.) ecoregions.

Como resultados da aplicação do CVi-m, considerando todas as cavernas do estudo em uma análise unificada, obtiveram-se dez cavernas de vulnerabilidade extrema. Todas essas cavernas são de litologia carbonática e ocorrem no bioma Cerrado. Em relação às ecorregiões, oito dessas ocorrem em Cerrado Woodlands and Savannas e duas ocorrem em Atlantic Dry Forests (Tabela 1). Essas dez cavernas representam 4.3% das cavernas inventariadas, nelas foram encontradas 712 espécies de invertebrados, ou seja, 16.6% da biodiversidade total encontrada no estudo. Em relação às espécies troglóbias, nessas dez cavernas ocorreram 47 das 190 espécies, o que representa 24.7% das espécies troglóbias do estudo.

Considerando os agrupamentos de cavernas que compartilham mesma litologia (carbonáticas, siliciclásticas, ferruginosas e granitoides), 28 cavernas se enquadraram em vulnerabilidade extrema, das quais onze são carbonáticas, três siliciclásticas, nove ferruginosas e cinco granitoides. Utilizando os agrupamentos por bioma, 17 cavernas foram consideradas de extrema vulnerabilidade (dez ocorrentes no bioma Cerrado e sete no bioma Mata Atlântica). Os agrupamentos formados pelas ecorregiões obtiveram o maior número de cavernas categorizadas como de extrema vulnerabilidade (31 cavernas), das quais seis pertencem à ecorregião Atlantic Dry Forests, 17 à Atlantic Forests e oito à Cerrado Woodlands and Savannas (Tabela 1). Considerar os cenários de maneira independente garantiu representatividade a todos os grupos dentre as cavernas prioritárias para conservação.

Considering all the caves in a unified analysis, the CVi-m application resulted in ten extremely vulnerable caves. All these caves are of carbonate lithology and are located in the Cerrado biome. In terms of ecoregions, eight of them occur in Cerrado Woodlands and Savannas and two occur in Atlantic Dry Forests (Table 1). These ten caves represent 4.3% of the inventoried caves, in which 712 species of invertebrates were found, i.e. 16.6% of the total biodiversity identified. With regard to troglobitic species, 47 of the 190 species were located in these ten caves, which represents 24.7% of the troglobitic species in the present work.

Analyzing the cave groupings that shared the same lithology (carbonate, siliciclastic, ferruginous and granitic), 28 caves were considered to be extremely vulnerable, and of which eleven are carbonate, three siliciclastic, nine ferruginous and five granitic. Using the biome groupings, 17 caves were considered to be extremely vulnerable (ten located in the Cerrado biome and seven in the Atlantic Forest biome). The ecoregion groupings obtained the highest number of caves categorized as extremely vulnerable (31 caves), of which six belong to the Atlantic Dry Forests ecoregion, 17 to the Atlantic Forests and eight to the Cerrado Woodlands and Savannas (Table 1). Considering the scenarios independently ensured that all the groups among the priority caves for conservation were representative.

Considerando a aplicação do CVi-m em grupos de cavernas distintos, de acordo com as características compartilhadas dentre os atributos de relevância ecológica (litologia, bioma e ecorregião), obtiveram-se 46 cavernas prioritárias para a conservação. Essas abrangem todas aquelas que atingiram vulnerabilidade extrema em ao menos um desses cenários de agrupamento. A maioria das 46 cavernas prioritárias para conservação apresentaram extrema vulnerabilidade em apenas um cenário de agrupamento (29 cavernas). Nessas 46 cavernas prioritárias para conservação, que representam 18.9% das cavernas inventariadas, ocorreram 1656 espécies de invertebrados, ou seja, 38.7% da biodiversidade total. Em relação às espécies troglóbias, nessas 46 cavernas ocorreram 104 espécies, o que representa 54.7% de todas as espécies troglóbias encontradas no estudo. Considerando os diferentes atributos de relevância ecológica, dez cavernas apresentaram extrema vulnerabilidade em todos os cenários. Essas dez cavernas são as mesmas classificadas como de extrema vulnerabilidade no cenário geral descrito acima, que considerou as 249 cavernas em conjunto (Tabela 1).

DISCUSSÃO

O presente trabalho demonstra a necessidade de se considerar em análises que buscam por prioridades para conservação e outras análises comparativas, os atributos que influenciam a ecologia das comunidades nos aspectos tomados como critérios. Demonstra-se que as riquezas apresentadas pelas cavernas de litologias, biomas e ecorregiões distintas, bem como os impactos que ocorrem sobre estas, não apresentam homogeneidade. O rearranjo da frequência dos impactos para cada um dos

Taken into account the CVi-m application in different cave groups, according to the characteristics shared among the ecological relevance attributes (lithology, biome and ecoregion), 46 priority caves for conservation were obtained. These include all those that have reached extreme vulnerability in at least one of these grouping scenarios. Most of the 46 priority caves for conservation showed extreme vulnerability in only one grouping scenario (29 caves). In these 46 priority caves, which represent 18.9% of the inventoried caves, 1656 invertebrates species occurred, or 38.7% of the total biodiversity. Regarding to troglobitic species, 104 species were found in these 46 caves, which represents 54.7% of all the troglobitic species identified. Considering the different ecological relevance attributes, ten caves showed extreme vulnerability in all scenarios. These ten caves are the same ones classified as extremely vulnerable in the general scenario described above, which considered all 249 caves together (Table 1).

DISCUSSION

This work demonstrates the need to consider the attributes that influence the ecology of communities in the aspects taken as criteria in analyses that seek priorities for conservation. It shows that the richness presented by caves from different lithologies, biomes and ecoregions, as well as the impacts that occur on them, are not homogeneous. The rearrangement of the impacts frequency for each of the groupings shows different levels of interaction and anthropic use for each scenario. This demonstrates the need to implement control measures aimed at

agrupamentos demonstra diferentes níveis de interação e uso antrópico para cada cenário. Isso demonstra a necessidade da implementação de medidas de controle direcionadas a cada cenário em particular. Para a conservação da biodiversidade, de fato, a análise das cavernas de maneira unificada aponta como prioridades cavernas inseridas em cenários cujos atributos de relevância ecológica favorecem maiores riquezas de espécies total e troglóbias. Ao mesmo tempo, as cavernas elencadas na análise geral não deixam de ser prioritárias nas demais análises que consideram os cenários de forma individualizada. Portanto, observa-se que as cavernas que são prioritárias no cenário geral, de fato merecem destaque para a conservação da biodiversidade. Entretanto, não englobam representatividade para todos os atributos, demonstrando a necessidade de objetivos claros de conservação antes da aplicação dos índices. Mesmo se todas as cavernas elencadas como prioritárias fossem conservadas não seriam suficientes para resguardar todas as espécies troglóbias, tão pouco as não troglóbias. Isso corrobora o elevado turnover e elevada taxa de endemismo das comunidades subterrâneas (MELEG *et al.*, 2013; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2015). Sendo assim, demonstra-se a necessidade de que as estratégias para conservação dos ecossistemas subterrâneos sejam o mais abrangentes possível.

É de amplo conhecimento que ecossistemas distintos, devido às suas peculiaridades diversas, comportam diferente número de espécies, bem como, são colonizados por espécies distintas (CLEMENTS, 1936; COX; MOORE; LADLE, 2016; GASTON, 2000). Como se percebe, nos ecossistemas subterrâneos isso também é um fato.

*each particular scenario. For biodiversity conservation, in fact, the analysis of the caves as a whole points to the priority of caves inserted in scenarios whose ecologically relevant attributes favor greater total and troglobitic species richness. At the same time, the caves listed in the general analysis do not cease to be priorities in the other analyses that consider the scenarios individually. Therefore, it can be seen that the caves that are priorities in the general scenario do indeed deserve to be highlighted for biodiversity conservation. However, they are not representative of all the attributes, demonstrating the need for clear conservation objectives before applying the indices. Even if all the caves listed as priorities were conserved, they wouldn't be enough to protect all the troglobitic species, nor the non-troglobitic ones. Which corroborates the high turnover and high rate of endemism of subterranean communities (MELEG *et al.*, 2013; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2015). This demonstrates the need for strategies to conserve subterranean ecosystems to be as comprehensive as possible.*

It is widely known that different ecosystems, due to their distinct peculiarities, contain different numbers of species, and are colonized by different species (CLEMENTS, 1936; COX; MOORE; LADLE, 2016; GASTON, 2000). As it can be seen, this is also true for subterranean ecosystems. As shown in other studies, lithology has influenced both troglobitic and non-troglobitic species richness (SOUZA-SILVA; INIESTA; FERREIRA, 2020; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Carbonate caves stood out in this scenario. This is to be expected, since they are generally larger, which favors colonization by a greater number of species and, at the same time, provides isolated microhabitats that are favorable for the occurrence of troglobitic species (MENDES RABELO; SOUZA-SILVA; LOPES FERREIRA, 2020; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA,

Assim como demonstrado em outros trabalhos, a litologia apresentou influências tanto sobre a riqueza de espécies troglóbias, quanto de não troglóbias (SOUZA-SILVA; INIESTA; FERREIRA, 2020; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). As cavernas carbonáticas foram destaque nesse cenário. Fato esperado, uma vez que no geral são maiores, o que favorece a colonização por maior número de espécies e, ao mesmo tempo, propicia a ocorrência de micro-habitats isolados, favoráveis à ocorrência de espécies troglóbias (MENDES RABELO; SOUZA-SILVA; LOPES FERREIRA, 2020; SIMÕES; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2015; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). Os diferentes biomas também apresentaram riquezas médias distintas tanto para a comunidade total de invertebrados, quanto para as espécies troglóbias, sendo o Cerrado o bioma de destaque. Sabe-se que o Cerrado é a savana mais rica do planeta (CARDOSO DA SILVA; BATES, 2002), porém, não supera o bioma Mata Atlântica em número de espécies conhecidas (RIBEIRO *et al.*, 2011). Portanto, a diferença observada na riqueza das cavernas provavelmente não está ligada ao pool de espécies regional, mas sim, às peculiaridades dos ecossistemas subterrâneos. Uma característica marcante das cavernas como habitat é a estabilidade climática. Em geral as cavernas apresentam umidade elevada e temperatura sem grandes oscilações, estando próximas às médias observadas para os habitats epígeos adjacentes (BADINO, 2010; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2018). Levando em consideração que as savanas apresentam dinâmicas hídricas e sazonalidades mais severas que florestas tropicais (WOODWARD; LOMAS; KELLY, 2004), supõe-se que a estabilidade climática das cavernas no Cerrado seja mais atrativa que na Mata Atlântica. Sendo assim, é justificável que as cavernas do Cerrado

2015; SOUZA-SILVA; MARTINS; FERREIRA, 2011). *The different biomes also showed different average richness for both the total invertebrate community and the troglobitic species, with the Cerrado biome standing out. It is known that the Cerrado is the richest savannah on the planet (CARDOSO DA SILVA; BATES, 2002), but it does not surpass the Atlantic Forest biome in terms of the number of known species (RIBEIRO et al., 2011). Therefore, the difference observed in the caves richness is probably not linked to the regional species pool, but rather to the peculiarities of subterranean ecosystems. A striking feature of caves as a habitat is their climatic stability. In general, caves have high humidity and temperatures that do not fluctuate greatly, being close to the averages observed for adjacent epigeal habitats (BADINO, 2010; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ et al., 2018). Taking into account that savannas have more severe water dynamics and seasonality than tropical forests (WOODWARD; LOMAS; KELLY, 2004), it is assumed that the climatic stability of caves in the Cerrado is more attractive than in the Atlantic Forest. It is therefore justifiable that Cerrado caves have a higher average species richness than caves in the Atlantic Forest. The same assumption can be made for ecoregions, since the boundaries proposed for these take into account the biomes, as well as the known distribution of flora and fauna species (OLSON et al., 2001).*

In applying the legal criteria for defining the relevance of caves, richness is an important factor. The legislation considers lithology as a preponderant factor for comparing caves, but disregards other relevant factors, such as those demonstrated here (BRASIL, 2008; MMA, 2017). With regard to the local scenario, which considers caves in the same geomorphological unit, these factors may be irrelevant as it is generally a continuous landscape.

apresentem maior média de riqueza de espécies que as cavernas da mata Atlântica. Para as ecorregiões, pode-se adotar a mesma suposição, uma vez que os limites propostos para estas levam em consideração os biomas, além da conhecida distribuição de espécies da flora e da fauna (OLSON *et al.*, 2001).

Para a aplicação dos critérios legais de definição de relevância de cavidades a riqueza é um fator importante. A legislação considera a litologia como fator preponderante para comparação entre cavidades, porém desconsidera outros fatores relevantes, como os aqui demonstrados (BRASIL, 2008; MMA, 2017). Com relação ao cenário local, que considera cavernas de uma mesma unidade geomorfológica, estes fatores podem ser irrelevantes por se tratar, em geral, de um contínuo de paisagem. Entretanto, ao considerar comparações em cenários regionais, esses atributos podem sim trazer vieses de comparação.

Ao avaliar a frequência dos impactos observa-se que, em todos os cenários, desmatamento e presença de vias de acesso (estradas) estão entre os mais frequentes. Em ambientes subterrâneos, a ausência de luz impede o estabelecimento de organismos fotossintetizantes, portanto, a estruturação das comunidades cavernícolas é dependente de recursos orgânicos de origem alóctone (CULVER; PIPAN, 2009). Nesta perspectiva, o desmatamento impacta diretamente as comunidades cavernícolas, uma vez que altera a disponibilidade de recursos no ambiente epígeo, que consequentemente reflete na disponibilidade dos recursos no ambiente hipógeo (PELLEGRINI; FERREIRA, 2016; SCHNEIDER; CHRISTMAN; FAGAN, 2011). As vias de acesso são portas de entrada para diversos outros impactos, uma vez

However, when considering regional scenarios, these attributes can lead to comparison biases.

When evaluating the frequency of impacts, it can be seen that, in all scenarios, deforestation and the presence of access roads are among the most frequent. In subterranean environments, the absence of light prevents the development of photosynthesizing organisms, so the structuring of cave communities is dependent on organic resources of allochthonous origin (CULVER; PIPAN, 2009). From this perspective, deforestation directly impacts cave communities, as it alters the availability of resources in the epigeal environment, which consequently reflects on the availability of resources in the hypogean environment (PELLEGRINI; FERREIRA, 2016; SCHNEIDER; CHRISTMAN; FAGAN, 2011). Access roads are gateways to various other impacts, as they allow humans and equipment to arrive, facilitating anthropogenic interventions. Farming practices were also observed with great frequency in the immediate surroundings of the caves. The implementation of these activities reduces the heterogeneity of the surrounding matrix, decreasing the diversity of species and is also a gateway for the use of pest controllers and fertilizers (ADLER; RAFF; LAUENROTH, 2001; KOLBEK; ALVES, 2008; NEILL; GUTIÉRREZ; ALEY, 2004; PARISE; PASCALI, 2003).

*As demonstrated by the three most observed impacts, the fragmentation of the landscape around the caves has been a real and frequent threat to these ecosystems. This high rate of habitat replacement, combined with the high biodiversity observed, corroborates the fact that all the caves in the study belong to regions considered hotspots for biodiversity conservation (MYERS *et al.*, 2000). Bringing this to the practical reality applicable to the study area, there is an inefficiency in the legal*

que propiciam a chegada do homem e de equipamentos, facilitando intervenções antrópicas. Práticas agropastoris também foram observadas com grande frequência no entorno imediato das cavernas. A implementação dessas atividades, reduz a heterogeneidade da matriz circundante, diminuindo a diversidade de espécies e, ainda, é porta de entrada para a utilização de controladores de pragas e fertilizantes (ADLER; RAFF; LAUENROTH, 2001; KOLBEK; ALVES, 2008; NEILL; GUTIÉRREZ; ALEY, 2004; PARISE; PASCALI, 2003).

Como demonstrado pelos três impactos mais observados, a fragmentação da paisagem no entorno das cavernas tem sido uma ameaça real e frequente a esses ecossistemas. Essa elevada taxa de substituição do habitat combinada à elevada biodiversidade observada, corrobora com o fato de todas as cavernas do estudo pertencerem a regiões consideradas hotspots para conservação da biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000). Trazendo para a realidade prática e aplicável à área do estudo, observa-se ineficiência dos mecanismos legais de fiscalização dos impactos às cavernas. A legislação brasileira, no que diz respeito ao patrimônio espeleológico, é uma das mais complexas do mundo, mas não tem sido respeitada (AULER, A S; PILÓ, 2015; CONAMA, 2004). Segundo a legislação, quaisquer atividades potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico devem passar por rigorosos estudos considerando aspectos biológicos, paleontológicos geológicos, arqueológicos e histórico-culturais (BRASIL, 2008; MMA, 2017). Deve-se também preservar a área de entorno das cavernas de modo a garantir a manutenção de suas características físicas e bióticas (BRASIL, 2008). A legislação prevê um raio e influência inicial a ser conservado de 250m acrescidos ao perímetro de desenvolvimento da caverna,

mechanisms for monitoring impacts on caves. Brazilian legislation on speleological heritage is one of the most complex in the world, nevertheless it has not been respected (AULER, A S; PILÓ, 2015; CONAMA, 2004). According to the legislation, any activities with a potential impact on speleological heritage must undergo rigorous studies considering biological, paleontological, geological, archaeological and historical-cultural aspects (BRASIL, 2008; MMA, 2017). The area surrounding the caves must also be preserved in order to guarantee the maintenance of their biotic and abiotic characteristics (BRASIL, 2008). The legislation determines the preservation of an initial 250 m influence radius in addition to the cave's development perimeter, until specific studies are carried out (CONAMA, 2004). As demonstrated by the impact assessment, the minimum influence radius has not been respected.

*Caves with ferruginous lithology stood out in relation to the impacts of erosion and bare soil. In addition to altering the availability of organic resources inside the caves, erosion and soil exposure alters the water infiltration rate, which can compromise the subterranean water availability, altering the habitat viability for the occurrence and reproduction of various species (CHIAVAZZO *et al.*, 2015; LANGER, 2001).*

*Impacts linked to the direct use of the caves were also observed, such as the presence of garbage, graffiti and soil compaction, which together with the depredation of speleothems constitute impacts associated with visitation (LOBO, 2006; PIANO *et al.*, 2022). Carbonate caves showed the highest frequency of these impacts. Caves of this lithology generally attract more visitors, since when compared to caves of other lithologies, they generally stand out in terms of size and ornamentation (AULER, AUGUSTO S, 2019; LOBO; PERINOTTO;*

até que estudos específicos sejam realizados (CONAMA, 2004). Como demonstrado pela avaliação de impactos, o raio de influência mínimo não tem sido respeitado.

As cavernas de litologia ferruginosa se destacaram em relação aos impactos de erosão e solo desnudo. A erosão e exposição do solo, além de alterar a disponibilidade de recursos orgânicos no interior das cavernas, altera a taxa de infiltração de água no solo, que pode comprometer a disponibilidade de água no subterrâneo, alterando a viabilidade do habitat para ocorrência e reprodução de diversas espécies (CHIAVAZZO *et al.*, 2015; LANGER, 2001).

Impactos ligados ao uso direto das cavernas também foram observados como: presença de lixo, pichação e compactação do solo, que junto à depredação de espeleotemas constituem impactos associados à visitação (LOBO, 2006; PIANO *et al.*, 2022). Cavernas carbonáticas foram as que apresentaram maior frequência desses impactos. Cavernas dessa litologia, em geral, atraem mais visitantes, uma vez que quando comparadas a cavernas de outras litologias, geralmente se destacam em tamanho e ornamenta o (AULER, AUGUSTO S, 2019; LOBO; PERINOTTO; BOGGIANI, 2008). Entretanto,   importante salientar que existem inúmeras cavernas turísticas que se desenvolvem em rochas não carbonáticas, inclusive dentre as cavernas inventariadas nesse estudo (e.g.: Monte Cristo e Salitre – Diamantina – MG). Entretanto, a maior parte das cavernas onde os impactos de visita o foram registrados não são consideradas turísticas. A fim de minimizar o impacto de visita o nesses casos, que demonstraram ser os mais corriqueiros no cenário atual, faz-se necessário implementar educa o ambiental

*BOGGIANI, 2008). However, it's important to note that there are numerous tourist caves that develop in non-carbonate rocks, including among the caves inventoried in this study (e.g.: Monte Cristo and Salitre - Diamantina - MG). However, most of the caves where visitor impacts were recorded are not considered tourist caves. In order to minimize visitation impact in these cases, which have proven to be the most common in the current scenario, it is necessary to implement environmental education focused on speleological heritage in communities living in areas where caves occur. Several researchers involved in this subject have promoted basic education with booklets, cordel literature methods and various materials (BENTO *et al.*, 2022; CUSTÓDIO *et al.*, 2013; DONATO *et al.*, 2018; FERREIRA; GOMES; SILVA, 2008). For this material to be effective, it is necessary to train local education professionals in the proper use and technical information about the elements and landscapes that make up karst.*

Given the great biodiversity found in Neotropical caves and the frequent impacts they have suffered, there is a growing need to implement conservation measures. Current legislation enables, among the speleological compensation measures for irreversible impacts on caves, the allocation of funds for the creation of speleological heritage protection areas (MMA, 2017). To help plan these areas, it is important to consider attributes of ecological relevance (lithology, biomes and ecoregions) to ensure that attributes similar to those of the impacted cave are included among the priorities for conservation. However, for conservation scenarios that prioritize biodiversity simply in terms of the number of species, caves that share ecologically relevant attributes favorable to the richness of troglobitic and non-troglobitic species would be the main targets. The caves considered

voltada ao patrimônio espeleológico nas comunidades residentes em áreas com ocorrência de cavernas. Diversos pesquisadores envolvidos nessa temática têm fomentado o ensino de base com cartilhas, cordéis, métodos e materiais diversos (BENTO *et al.*, 2022; CUSTÓDIO *et al.*, 2013; DONATO *et al.*, 2018; FERREIRA; GOMES; SILVA, 2008). Para que esse material tenha efetividade, é necessário capacitar os profissionais locais, que atuam na educação, quanto ao uso adequado e informações técnicas sobre os elementos e paisagens que compõem o carste.

Mediante à grande biodiversidade observada nas cavernas neotropicais e os frequentes impactos que têm sofrido, é crescente a necessidade de implementação de medidas de conservação. A legislação atual prevê, dentre as medidas de compensação espeleológica para impactos irreversíveis em cavernas, a destinação de verba para a criação de áreas de proteção ao patrimônio espeleológico (MMA, 2017). Como demonstrado, para auxiliar no planejamento dessas áreas, é importante considerar atributos de relevância ecológica (litologia, biomas e ecorregiões) para garantir que atributos semelhantes ao da caverna impactada sejam inclusos dentre as prioridades para conservação. Entretanto, para cenários de conservação que priorizam a biodiversidade pensando simplesmente em número de espécies, cavernas que compartilham atributos de relevância ecológica favoráveis às riquezas de espécies troglóbias e não troglóbias seriam os alvos principais. As cavernas consideradas prioritárias no cenário geral (considerando todas as cavernas em análise única) se destacam também nos subgrupos de mesmos atributos de relevância ecológica. Essas cavernas abrangeram praticamente um quarto das espécies troglóbias do estudo e um sexto das espé-

priorities in the overall scenario (considering all the caves in a single analysis) also stand out in the subgroups with the same ecologically relevant attributes. These caves covered almost a quarter of the troglobitic species in the study and a sixth of the total species. Although caves that share ecologically relevant attributes favorable to species richness are privileged when it comes to targeting conservation measures, from the point of view of their efficiency in conserving biodiversity, they do deserve to be highlighted.

*The conservation of speleological heritage has been on the agenda in various regions of the world and uses different methodologies to list its priorities (BORGES *et al.*, 2012; NITZU *et al.*, 2018; RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005). In most cases, when it comes to conserving the biodiversity of subterranean ecosystems, the main focus is on troglobitic species (BORGES *et al.*, 2012; DELIĆ *et al.*, 2017; NITZU *et al.*, 2018). In fact, troglobitic species deserve extra attention, since they have a high degree of endemism (CHRISTMAN *et al.*, 2005; CULVER *et al.*, 2003). These species generally occur in a few, or even a single cave, where their actual distribution may still be restricted to specific microhabitats (DELIĆ *et al.*, 2017; HARRIES *et al.*, 2019). This means that a large number of troglobitic species are threatened with extinction (DELIĆ *et al.*, 2017). Therefore, in scenarios where conservation measures will encompass a small number of caves, caution should be exercised when considering ecologically relevant attributes. Considering them results in the importance of endemic species being diluted in a scenario with a greater number of priority caves. From the point of view of conserving subterranean biodiversity, it is essential to consider the maximum weight of troglobitic species, since they are generally threatened. For*

cies totais. Por mais que cavernas que compartilham atributos de relevância ecológica favoráveis às riquezas de espécies sejam privilegiadas no direcionamento de medidas de conservação, do ponto de vista de eficiência para conservação da biodiversidade, de fato, merecem destaque.

A conservação do patrimônio espeleológico tem sido pauta em diversas regiões do mundo e utiliza de metodologias diversas para elencar suas prioridades (BORGES *et al.*, 2012; NITZU *et al.*, 2018; RABELO; SOUZA-SILVA; FERREIRA, 2018; VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005). Na maioria dos casos, quando se refere à conservação da biodiversidade dos ecossistemas subterrâneos, o enfoque principal é dado às espécies troglóbias (BORGES *et al.*, 2012; DELIĆ *et al.*, 2017; NITZU *et al.*, 2018). De fato, as espécies troglóbias merecem atenção redobrada, uma vez que apresentam elevado grau de endemismo (CHRISTMAN *et al.*, 2005; CULVER *et al.*, 2003). Essas espécies ocorrem geralmente em poucas, ou até mesmo em uma única caverna, onde sua distribuição real pode ser, ainda, restrita a micro-habitats específicos (DELIĆ *et al.*, 2017; HARRIES *et al.*, 2019). Isso faz com que grande parte das espécies troglóbias se enquadrem como ameaçadas de extinção (DELIĆ *et al.*, 2017). Sendo assim, em cenários que as medidas de conservação englobarão um número pequeno de cavernas, deve-se ter cautela na consideração dos atributos de relevância ecológica. Considerá-los resulta na diluição da importância das espécies endêmicas num cenário de maior número de cavernas prioritárias. Do ponto de vista de conservação da biodiversidade subterrânea, é fundamental considerar o peso máximo das espécies troglóbias, uma vez que em geral são ameaçadas. Para cenários de conservação mais adequados quanto à heterogeneidade, além da

conservation scenarios that are more appropriate in terms of heterogeneity, in addition to taking into account the attributes of ecological relevance, it is necessary to integrate different areas (e.g.: biology, archaeology, geology and historical-cultural), where conservation priorities should result from the overlapping of various analyses with different perspectives (CROFTS, 2019). In this way, it adds to biodiversity conservation, as well as to the conservation of various attributes relevant to other areas.

As it can be seen, there is a need to increase vigilance in terms of cave conservation. Despite the existence of specific legislation, various activities impacting on speleological heritage have gone unnoticed. In order to improve knowledge and monitoring by the various actors, there is a need to incorporate speleology into other related themes, bringing diversity to the legal framework that encompasses caves. Examples include the current Forest Code, which makes no mention of subterranean natural caves or any other speleological feature (BRASIL, 2012). There is also the Rural Environmental Registry (Cadastro Ambiental Rural - CAR), approved by the Ministry of the Environment in 2014 with the aim of integrating environmental information from rural properties, which also ignores the occurrence of caves on properties (MMA, 2014). The inclusion of the speleological theme in these other legal tools could expand knowledge of the speleological heritage by simply registering caves that are still unknown, as well as preventing deforestation near the entrances.

consideração dos atributos de relevância ecológica, é necessário que haja integração de diversas áreas (e.g.: biologia, arqueologia, geologia e histórico-cultural), onde as prioridades para conservação devam resultar da sobreposição de diversas análises com diferentes perspectivas (CROFTS, 2019). Dessa maneira, agrega-se para conservação da biodiversidade, bem como para a conservação de diversos atributos relevantes às demais áreas.

Como percebido, é necessário aumentar a vigilância quanto à conservação das cavernas. Apesar da existência de legislação específica, diversas atividades impactantes ao patrimônio espeleológico têm passado despercebidas. A fim de melhorar o conhecimento e a fiscalização pelos diversos atores, percebe-se a necessidade de incorporar a temática espeleológica a outras temáticas relacionadas, trazendo diversidade ao arcabouço legal que engloba as cavernas. Como exemplos podemos citar o atual Código Florestal que se quer menciona cavidades naturais subterrâneas ou qualquer outra feição espeleológica (BRASIL, 2012). Temos também o Cadastro Ambiental Rural – CAR, chancelado pelo Ministério do Meio Ambiente em 2014 com a finalidade de integrar informações ambientais de propriedades rurais, que também despreza a ocorrência de cavernas nas propriedades (MMA, 2014) . A inclusão da temática espeleológica nessas outras ferramentas legais pode ampliar o conhecimento do patrimônio espeleológico pelo simples cadastramento de cavernas ainda desconhecidas, bem como evitar o desmatamento nas proximidades das entradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ADLER, P.; RAFF, D.; LAUENROTH, W. The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia*, v. 128, n. 4, p. 465–479, 2001.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AULER, A S; PILÓ, L. B. Caves and Mining in Brazil: The Dilemma of Cave Preservation Within a Mining Context. In: AMDREO, B. *et al.* (Org.). . *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. 1. ed. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2015. p. 487–496.

AULER, AUGUSTO S. As Regiões Espeleológicas do Brasil. In: RUBBIOLI, E. *et al.* (Org.). . *Cavernas - Atlas do Brasil Subterrâneo*. Brasília, Brasil: ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. p. 13–52.

BACON, F. Human Impacts and Environmental Rehabilitation. In: FORD, D.; WILLIAMS, P. (Org.). . *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. 2. ed. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West: John Wiley & Sons, 2007. p. 471–504.

BADINO, G. Underground Meteorology - "What ' S the Weather Underground ?" Podzemna Meteorologija : " Kaksno Je Vreme V Podzemlju ?" *Acta Carsologica*, v. 39, n. 3, p. 427–448, 2010.

BENTO, D. DE MEDEIROS *et al.* *Vida nas CaveRNas*. Brasília/DF, Brasil: Instituto Chico Mendes de conservação da Biodiversidade, Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conervação de Cavernas, 2022. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/publicacoes/Cartilha_Vida_nas_CaveRNas_Digital_IYCK2021.pdf>.

BIONDIC, R. *et al.* *Life and water on karst*. Ljubljana: Založba ZRC, 2015.

BLAMONT, J. A roadmap to cave dwelling on the Moon and Mars. *Advances in Space Research*, v. 54, n. 10, p. 2140–2149, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.019>>.

BORGES, P. A. V *et al.* Volcanic caves: Priorities for conserving the Azorean endemic troglobiont species. *International Journal of Speleology*, v. 41, n. 1, p. 101–112, 2012.

BRASIL. *Decreto No 6.640, de 07 de novembro de 2008*. . Brasil: Diário Oficial da União. , 2008

BRASIL. *Lei No 12.651, de 25 de maio de 2012*. . Brasília, Brasil: Diário Oficial da União. , 2012

CARDOSO DA SILVA, J. M.; BATES, J. M. Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot. *BioScience*, v. 52, n. 3, p. 225, 2002.

CARVALHO GUERRA, L. C. Potencial Biotecnológico De Bactérias Cultiváveis Obtidas a Partir Da Gruta Martimiano Ii, Parque Estadual Do Ibitipoca – Mg. *Revista Brasileira de Espeleologia - RBEsp*, p. 62–86, 2022. Disponível em: <<https://revistaeletronica.icmbio.gov.br/rebe/article/view/2318/1410>>.

CHAPE, S. *et al.* Measuring the Extent and Effectiveness of Protected Areas as an Indicator for Meeting Global Biodiversity Targets. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, v. 360, n. 1454, p. 443–455, 2005.

CHIAVAZZO, E. *et al.* Cave spiders choose optimal environmental factors with respect to the generated entropy when laying their cocoon. *Scientific Reports*, v. 5, n. January, 2015.

CHRISTMAN, M. C. *et al.* Patterns of endemism of the eastern North American cave fauna. *Journal of Biogeography*, v. 32, n. 8, p. 1441–1452, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2699.2005.01263.x>>.

CLEMENTS, B. Y. F. E. Nature and Structure of the Climax. *Journal of ecology*, v. 24, n. 1, p. 252–284, 1936.

COLUMBU, A. *et al.* Stalagmites: from Science Application to Museumization. *Geoheritage*, v. 13, n. 2, p. 1–11, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12371-021-00573-9>>.

CONAMA, C. N. DO M. A.-. *Resolução CONAMA No 347, de 10 de setembro de 2004.* . Brasil: Diário oficial da união - Edição 176. , 2004

COX, C. B.; MOORE, P. D.; LADLE, R. J. *Biogeography an Ecological and Evolutionary Approach*. 9. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016.

CROFTS, R. Linking geoconservation with biodiversity conservation in protected areas. *International Journal of Geoheritage and Parks*, p. 13, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.019>>.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. *Nature*, v. 415, n. 6867, p. 23, 2002.

CULVER, D. C. *et al.* The North American obligate cave fauna : regional patterns. *Biodiversity and Conservation*, v. 12, p. 441–468, 2003.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. The subterranean domain. In: CULVER, D. C.; PIPAN, T. (Org.). . *The biology of caves an other subterranean habitats*. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2009. p. 1–22.

CUSTÓDIO, R. P. *et al.* The virtual tourism in caves as a didatic-inclusive instrument. *Nature and Conservation*, v. 6, n. 2, p. 70–84, 2013.

DELIĆ, T. *et al.* The importance of naming cryptic species and the conservation of endemic subterranean amphipods. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, 1 dez. 2017.

DONATO, C. R. *et al.* *Protegendo as cavernas do Brasil*. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, 2018.

FERREIRA, R. L.; GOMES, F. T. M. C.; SILVA, M. S. USE OF THE BOOKLET "ADVENTURE OF LIFE IN CAVES" AS AN EDUCATIONAL TOOL IN ACTIVITIES FOR TOURISM IN KARST REGIONS. *Pesquisa em Turismo e Paisagens Cársticas*, v. 1, n. 2, p. 145–164, 2008.

GASTON, K. J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, v. 405, n. 6783, p. 220–7, 2000. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10821282>>.

HARRIES, D. *et al.* The world ' s largest known subterranean fish : a discovery in Meghalaya (NE India) of a cave-adapted fish related to the Golden Mahseer , Tor putitora The world ' s largest known subterranean fish : a discovery in Meghalaya (NE India) of a cave-adapt. *Cave and Karst Science*, v. 46, n. 3, p. 121–126, 2019.

IUCN STANDARDS AND PETITIONS SUBCOMMITTEE. *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 13*. [S.l.]: IUCN, 2017. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>>.

KOLBEK, J.; ALVES, R. J. V. Impacts of cattle, fire and wind in rocky savannas, southeastern Brazil. *Acta Universitatis Carolinae, Environmentalica*, v. 22, n. 1–2, p. 111–130, 2008.

KUNZ, T. H. *et al.* Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1223, n. 1, p. 1–38, 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1749-6632.2011.06004.x>>.

LANGER, W. H. *Potential environmental impacts of quarrying stone in karst—A literature review*. US Geological Survey. [S.l.: s.n.], 2001. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Potential+Environmental+Impacts+of+Quarrying+Stone+in+Karst-#0>>.

LAURANCE, W. F. The Anthropocene. *Current Biology*, v. 29, p. 953–954, 2019.

LAURITZEN, S. E.; LUNDBERG, J. Speleothems and climate: A special issue of The Holocene. *Holocene*, v. 9, n. 6, p. 643–647, 1999.

LECHLEITNER, F. A. *et al.* The Potential of Speleothems from Western Europe as Recorders of Regional Climate: A Critical Assessment of the SISAL Database. *Quaternary*, v. 1, n. 3, p. 30, 2018.

LÉVEILLÉ, R. J.; DATTA, S. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review. *Planetary and Space Science*, v. 58, n. 4, p. 592–598, 2010.

LOBO, H. A. S. Caracterização dos impactos ambientais negativos do espeleoturismo e suas possibilidades de manejo. 2006, Caxias do Sul, RS, Brasil: IV SeminTUR, 2006. p. 15.

- LOBO, H. A. S.; PERINOTTO, J. A. DE J.; BOGGIANI, P. C. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perspectivas de sustentabilidade. *Revista Brasileira de Ecoturismo*, v. 1, n. 1, 2008.
- LOVEJOY, T. E. Protected areas: a prism for a changing world. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 21, n. 6, p. 329–333, 2006.
- MAMMOLA, S. Finding answers in the dark: caves as models in ecology fifty years after Poulson and White. *Ecography*, v. 41, n. October 2018, p. 1–21, 2018.
- MAMMOLA, S. *et al.* Scientists' warning on the conservation of subterranean ecosystems. *BioScience*, v. 69, n. 8, p. 641–650, 2019.
- MANN, H.B., WHITNEY, D. R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.
- MAZINA, S. E.; EGOROV, M. I.; HARLAMOVA, M. D. Plastics Biodestruction under the Impact of Caves Micromycetes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 272, n. 3, 2019.
- MELEG, I. N. *et al.* Can Environment Predict Cryptic Diversity? The Case of Niphargus Inhabiting Western Carpathian Groundwater. *PLoS ONE*, v. 8, n. 10, 2013.
- MENDES RABELO, L.; SOUZA-SILVA, M.; LOPES FERREIRA, R. Epigeal and hypogean drivers of Neotropical subterranean communities. *Journal of Biogeography*, n. September, p. 1–14, 2020.
- MILANOVIC, P. T. *Water resources engineering in karst*. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. *Instrução Normativa Nº 2/MMA, de 06 de Maio de 2014*. . Brasília, Brasil: Diário Oficial da União. , 2014
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Instrução normativa No2, de 30 de agosto de 2017*. . Brasil: Diário Oficial da União. , 2017
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE / SBF - SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTA. *Cobertura vegetal dos biomas brasileiros*. . Brasília, Brasil: Brasil. Disponível em: <www.mma.gov.br/portalbio>. , 2006
- MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853–8, 2000. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10706275>>.
- NEILL, H.; GUTIÉRREZ, M.; ALEY, T. Influences of agricultural practices on water quality of Tumbling Creek cave stream in Taney County, Missouri. *Environmental Geology*, v. 45, n. 4, p. 550–559, 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00254-003-0910-2>>.

- NEWMAN, E. A. Disturbance ecology in the anthropocene. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 7, n. May, 2019.
- NITZU, E. *et al.* Assessing preservation priorities of caves and karst areas using the frequency of endemic cave-dwelling species. *International Journal of Speleology*, v. 47, n. January, p. 43–52, 2018.
- OLSON, D. M. *et al.* *Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth*. . [S.l.]: Bioscience (51)11. , 2001
- OSBORNE, R. A. L. Saving and conserving the caves: reflections on 37 years of listings, disputes, submissions and court cases. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 66, n. 6, p. 767–778, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/08120099.2018.1489895>>.
- OSTER, J. *et al.* Speleothem Paleoclimatology for the Caribbean, Central America, and North America. *Quaternary*, v. 2, n. 1, p. 5, 2019.
- P.J. BOSTON *et al.* Cave biosignature suites: Microbes, Minerals, and Mars. *Astrobiology*, v. 1, n. 1, p. 25–57, 2001.
- PARISE, M.; PASCALI, V. Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). *Environmental Geology*, v. 44, n. 3, p. 247–256, 2003. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00254-003-0773-6>>.
- PAWLOWSKI, A. C. *et al.* A diverse intrinsic antibiotic resistome from a cave bacterium. *Nature Communications*, v. 7, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13803>>.
- PELLEGRINI, T. G.; FERREIRA, R. L. Are inner cave communities more stable than entrance communities in Lapa Nova show cave ? *Subterranean Biology*, v. 20, n. November, p. 15–37, 2016.
- PIANO, E. *et al.* A literature-based database of the natural heritage, the ecological status and tourism-related impacts in show caves worldwide. *Nature Conservation*, v. 50, p. 159–174, 2022.
- RABELO, L. M.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Priority caves for biodiversity conservation in a key karst area of Brazil: comparing the applicability of cave conservation indices. *Biodiversity and Conservation*, v. 27, n. 9, p. 2097–2129, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10531-018-1554-6>>.
- RANDS, M. R. W. *et al.* Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010. *Science*, v. 329, n. 5997, p. 1298–1303, 2010.
- RIBEIRO, M. C. *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: A Shrinking Biodiversity Hotspot. In: ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (Org.). . *Biodiversity hotspots*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. p. 277–293. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-20992-5>>.

- SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, D. *et al.* The deep subterranean environment as a potential model system in ecological, biogeographical and evolutionary research. *Subterranean Biology*, v. 25, p. 1–7, 2018.
- SCHNEIDER, K.; CHRISTMAN, M. C.; FAGAN, W. F. The influence of resource subsidies on cave invertebrates: results from an ecosystem-level manipulation experiment. *Ecology*, v. 92, n. 3, p. 765–776, 2011.
- SIMÕES, M. H.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Cave invertebrates in Northwestern Minas Gerais state, Brazil : endemism , threats and conservation priorities. *Acta Carsologica*, v. 43, n. 1, p. 159–174, 2014.
- SIMÕES, M. H.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Cave physical attributes influencing the structure of terrestrial invertebrate communities in Neotropics. *Subterranean Biology*, v. 16, p. 103–121, 2015.
- SKET, B. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals? *Journal of Natural History*, v. 42, n. 21–22, p. 1549–1563, 2008. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222930801995762>>.
- SOUZA-SILVA, M. *Ecologia e conservação das comunidades de invertebrados cavernícolas na mata atlântica brasileira*. 2008. 217 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- SOUZA-SILVA, M.; INIESTA, L. F. M.; FERREIRA, R. L. Cave lithology effect on subterranean biodiversity: A case study in quartzite and granitoid caves. *Acta Oecologica*, v. 108, n. August, p. 103645, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103645>>.
- SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. *Biodiversity and Conservation*, v. 20, n. 8, p. 1713–1729, 2011.
- SUPERINTENDÊNCIA DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS - SPRH. *Bacias Hidrográficas DNAEE*. . Brasília, Brasil: Agência Nacional de Águas - ANA. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br>>. , 2015
- VAN BEYNEN, P.; TOWNSEND, K. A Disturbance Index for Karst Environments. *Environmental Management*, v. 36, n. 1, p. 101–116, 2005.
- WOODWARD, F. I.; LOMAS, M. R.; KELLY, C. K. Global climate and the distribution of plant biomes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 359, n. 1450, p. 1465–1476, 2004.
- WYNNE, J. J. *et al.* Capturing arthropod diversity in complex cave systems. *Diversity and Distributions*, v. 24, n. 10, p. 1478–1491, 2018.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela 1 – Lista das cavernas consideradas prioritárias para conservação com base na aplicação do Cave Vulnerability index modificado por Simões e colaboradores (2014). O índice foi aplicado inicialmente considerando todas as cavernas. Posteriormente foi aplicado em grupos distintos formados de acordo com os atributos ecológicos relevantes de litologia, bioma e ecorregião. Cada categoria contida nesses atributos originou um grupo utilizado para aplicação do índice. Na tabela se caracteriza a caverna em relação ao nome, município de ocorrência, litologia, bioma e ecorregião. Na coluna “Geral”, assinaladas com “X” estão as cavernas de vulnerabilidade extrema considerando todo o banco de dados. Em “Por Litologia” estão assinaladas as cavernas cuja vulnerabilidade é extrema em relação aos grupos formados pelas litologias. Da mesma maneira, em “Por Bioma” estão assinaladas as cavernas de vulnerabilidade extrema obtidas nos grupos Cerrado e Mata Atlântica. Em “Por Ecorregião” estão as cavernas de vulnerabilidade extrema assinaladas nos grupos formados pelas ecorregiões. Por fim, temos a frequência de vezes que a caverna se destacou em extrema vulnerabilidade ao longo dos diferentes agrupamentos (Frequência).

Caverna	Município	Litologia	Bioma	Ecorregião	Geral	Por Litologia	Por Bioma	Por Ecorregião	Frequência
Gruta Sumitumba	Coração de Jesus	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Maquiné	Cordisburgo	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa do Saco Comprido	Curvelo	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests	X	X	X	X	4
Lapa d'água do Zezé	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Sem Fim	Luislandia	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa d'água MOC	Montes Claros	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Encantada	Montes Claros	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Gruta da Lagoa Rica	Paracatu	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Gruta Zé Avelino I	Varzelandia	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests	X	X	X	X	4
Lapa Nova	Vazante	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Santa_FS	Felicio dos Santos	Siliciclastic	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X	X	3
Monte Cristo	Diamantina	Siliciclastic	Cerrado	Atlantic Forests		X		X	2

Caverna	Município	Litologia	Bioma	Ecorregião	Geral	Por Litologia	Por Bioma	Por Ecorregião	Frequência
Salitre_Diamantina	Diamantina	Siliciclastic	Cerrado	Atlantic Forests		X		X	2
Toca Itajubá	Jequitinhonha	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Toca Juparanã	Jequitinhonha	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Gruta do Taboleirinho	Juvenília	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X		X	2
Gruta do Labirinto	Munhoz	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Zé Capucho	Novo O. de Minas	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Gand_0073	Santa Barbara	Ferruginous	Atlantic forest	Atlantic Forests			X	X	2
Senhor do Bom Fim	Ataleia	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X			1
AVG-66	Caete	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas		X			1
AVG-71	Caete	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas		X			1
Buraco dos Curiós	Dores	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests				X	1
Gruta dos Fornos I	Iguatama	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests				X	1
Caverna da água do João Ferreira	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests				X	1
Gruta do Nestor	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X	1		
Gruta Manequinho	Lima Duarte	Siliciclastic	Atlantic forest	Atlantic Forests	X		1		
Gruta 9	Matutina	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Lapa do Marcelo	Monjolos	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta do veado	Montalvania	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X	1		
Gruta Cinderela	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta Cristais	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta das Cerâmicas	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		

Caverna	Município	Litologia	Bioma	Ecorregião	Geral	Por Litologia	Por Bioma	Por Ecorregião	Frequência
Gruta do Isaias	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta Fazenda Amargoso Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Lanchonete da Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Olhos D'Água Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Paranoá Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Serra Azul Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Caverna do Morro Grande	Riacho dos Machados	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X		1		
AVG-05	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-30	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-38	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-41	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-47	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-48	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table 1 – List of caves considered priorities for conservation based on the application of the Cave Vulnerability index modified by Simões and collaborators (2014). The index was initially applied considering all the caves. It was then applied to distinct groups formed according to the relevant ecological attributes of lithology, biome and ecoregion. Each category contained in these attributes gave rise to a group used to apply the index. The table characterizes the cave in terms of name, municipality of occurrence, lithology, biome and ecoregion. In the “General” column, caves with extreme vulnerability are marked with an “X”, considering the entire database. The “By lithology” column shows the caves whose vulnerability is extreme in relation to the groups formed by the lithologies. Similarly, “By Biome” shows the caves with extreme vulnerability in the Cerrado and Atlantic Forest groups. “By Ecoregion” shows the extremely vulnerable caves found in the ecoregion groups. Finally, the frequency of times that the cave stood out in terms of extreme vulnerability throughout the different groupings (Frequency).

Cave	Municipality	Lithology	Biome	Ecoregion	General	By lithology	By Biome	By Ecoregion	Frequency
Gruta Sumitumba	Coração de Jesus	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Maquiné	Cordisburgo	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa do Saco Comprido	Curvelo	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests	X	X	X	X	4
Lapa d'água do Zezé	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Sem Fim	Luislandia	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa d'água MOC	Montes Claros	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Encantada	Montes Claros	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Gruta da Lagoa Rica	Paracatu	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Gruta Zé Avelino I	Varzelândia	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests	X	X	X	X	4
Lapa Nova	Vazante	Carbonatic	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	X	X	X	4
Lapa Santa_FS	Felício dos Santos	Siliciclastic	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X	X	3

Cave	Municipality	Lithology	Biome	Ecoregion	General	By lithology	By Biome	By Ecoregion	Frequency
Monte Cristo	Diamantina	Siliciclastic	Cerrado	Atlantic Forests		X		X	2
Salitre_Diamantina	Diamantina	Siliciclastic	Cerrado	Atlantic Forests		X		X	2
Toca Itajubá	Jequitinhonha	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Toca Juparanã	Jequitinhonha	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Gruta do Taboleirinho	Juvenília	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X		X	2
Gruta do Labirinto	Munhoz	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Zé Capucho	Novo O. de Minas	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X	X		2
Gand_0073	Santa Barbara	Ferruginous	Atlantic forest	Atlantic Forests			X	X	2
Senhor do Bom Fim	Ataleia	Granitoid	Atlantic forest	Atlantic Forests		X			1
AVG-66	Caete	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas		X			1
AVG-71	Caete	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas		X			1
Buraco dos Curiós	Dores	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests				X	1
Gruta dos Fornos I	Iguatama	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests				X	1
Caverna da água do João Ferreira	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests				X	1
Gruta do Nestor	Itacarambi	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X	1		
Gruta Manequinho	Lima Duarte	Siliciclastic	Atlantic forest	Atlantic Forests	X		1		
Gruta 9	Matutina	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Lapa do Marcelo	Monjolos	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta do veado	Montalvania	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Dry Forests		X	1		
Gruta Cinderela	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta Cristais	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		

Cave	Municipality	Lithology	Biome	Ecoregion	General	By lithology	By Biome	By Ecoregion	Frequency
Gruta das Cerâmicas	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta do Isaías	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests		X	1		
Gruta Fazenda Amargoso Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Lanchonete da Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Olhos D'Água Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Paranoá Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Gruta Serra Azul Pains	Pains	Carbonatic	Cerrado	Atlantic Forests	X		1		
Caverna do Morro Grande	Riacho dos Machados	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X		1		
AVG-05	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-30	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-38	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-41	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-47	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			
AVG-48	Sabará	Ferruginous	Cerrado	Cerrado W. Savannas	X	1			

APÊNDICES

Apêndice 1

Caracterização das cavernas quanto a aplicação do Cave Vulnerability index modificado por Simões e colaboradores (2014). Nome da caverna (Caverna); coordenadas geográficas (Datum: WGS84) em graus decimais Longitude (Long.) e Latitude (Lat.); município de ocorrência (Município); litologia na qual se insere (Lit.) podendo ser carbonática (Car.), siliciclástica (Sil.), ferruginosa (Fer.) ou granitoide (Gra.); Bioma (Bio.) Podendo ser Cerrado (C.) ou Mata Atlântica (M.A.); Ecorregião (Ecor.) podendo ser Atlântic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) ou Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.); desenvolvimento linear amostrado (D.L.A.) informado em metros; soma da extensão das entradas (E.E.) informada em metros, riqueza total de espécies encontradas (R.), riqueza relativa segundo a metodologia de CVi-m (R.R.), riqueza de espécies consideradas troglóbias (T.R.), impactos observados de acordo com o número de referência apresentado no Apêndice 3 (Impactos), somatório obtido para os pesos dos impactos atribuídos de acordo com o Apêndice 3 (I.W.), grau de vulnerabilidade da caverna pela aplicação do CVi-m em escala geral (VU.G.), grau de vulnerabilidade da caverna obtida pela aplicação do CVi-m considerando as diferentes litologias (VU.L.), grau de vulnerabilidade da caverna pela aplicação do CVi-m considerando os diferentes biomas (VU.B.), grau de vulnerabilidade da caverna considerando as diferentes ecorregiões (VU.E.), inserção da caverna nas áreas prioritárias propostas pelo CECAV (C.P.A.) informando a categoria da área na qual se inserem (1, 2, 3 ou 4) ou a não inserção em nenhuma das categorias (N).

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Cachorros	-44,367739	-21,772617	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	20	5	25	0,2500	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Joao Japones I	-44,366253	-21,773976	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	10	46	0,1150	0	7	4	2	2	2	2	1
Joao Japones II	-44,365331	-21,774704	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	4	30	0,1875	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Joao Japones IV	-44,366166	-21,773975	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	4	29	0,1813	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Novatos	-44,320526	-21,785557	Andrelândia	Sil.	A.F.	A.F.	15	5	26	0,3467	0	7,13	10	1	2	2	2	1
Toca da Passagem	-44,366595	-21,773290	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	12	6	12	0,1667	0	7	4	1	1	1	1	1
Alinhamento	-45,637589	-20,264666	Arcos	Car.	C.	A.F.	230	10	28	0,0122	2	3,7,8	14	2	2	2	2	3
Gruta Branca	-45,596693	-20,284789	Arcos	Car.	C.	A.F.	200	5	60	0,0600	2	7	4	2	2	2	3	1
Zé Colméia	-45,596039	-20,281583	Arcos	Car.	C.	A.F.	8	4	56	1,7500	2	7	4	2	2	2	3	1
Lapa da Camila	-46,370321	-15,910298	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	120	5	116	0,1933	4	2,3,7	15	3	3	3	3	4
Lapa da Capa	-46,329445	-15,948045	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	480	17	112	0,0137	1	N	0	2	2	2	2	N
Lapa da Marcela	-46,361448	-15,911692	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	400	125	94	0,0019	1	2,6,7,8	19	2	2	2	2	4
Lapa da Suindara	-46,362388	-15,914036	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	160	16,9	56	0,0207	1	2,3,5,7	21	2	2	2	2	4
Lapa do Salobo	-46,218661	-15,489361	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	40	6,8	52	0,1912	2	2,3,7,12,13	30	3	3	3	3	4
Velho Juca	-46,362901	-15,912514	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	70	7,2	47	0,0933	2	2,3,5,7	21	2	2	2	2	4
João Matias	-40, 980060	-18,129753	Ataléia	Gra.	A.F.	A.F.	190	10	24	0,0126	1	3,4,7,8,12, 20	29	2	3	3	2	3
Senhor do Bonfim	-41, 292654	-18,194022	Ataléia	Gra.	A.F.	A.F.	203	10	55	0,0271	0	3,4,7,8,12, 13,14,20	41	2	4	3	3	N
C. S. Francisco	-45,922061	-20,308894	Bambuí	Car.	C.	C.W.S.	70	5	21	0,0600	1	3,4,7,8	20	2	2	2	2	3
Gruta Mamoneiras	-44,493255	-16,400322	Brasília de Minas	Car.	C.	C.W.S.	450	5,5	57	0,0230	2	3,7,8,9,12, 13,20	34	3	3	3	3	N

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Lapa da lagoa	-44,130059	-17,938170	Buenópolis	Car.	C.	C.W.S.	80	4,5	70	0,1944	2	7, 8, 9, 12, 13, 20	23	2	2	2	2	2	N
Lapa do Coronel	-44,129680	-17,883887	Buenópolis	Car.	C.	C.W.S.	40	8	40	0,1250	0	7, 8, 9, 13, 20	21	2	2	2	2	2	N
SPT_129	-43,365394	-19,090793	C. Mato Dentro	Fer.	A.F.	A.F.	67	11	55	0,0746	0	3, 7	9	2	2	2	2	2	1
SPT_151	-43,364456	-19,092528	C. Mato Dentro	Fer.	A.F.	A.F.	85	6,3	44	0,0822	1	3, 4, 5, 7	21	2	3	3	3	2	1
SPT_583	-43,264619	-19,173095	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	150	8,4	46	0,0364	1	3, 7	9	2	2	3	2	2	N
SPT_584	-43,264644	-19,166202	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	63	12,3	28	0,0361	0	3, 7	9	1	2	2	2	2	N
SPT_585	-43,264843	-19,174425	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	117	8	46	0,0516	2	3, 7	9	2	3	3	3	3	N
Gruta do Caido	-47,246102	-16,208907	Cabeceira Grande	Car.	C.	C.W.S.	400	30	69	0,0058	2	3, 4, 11, 12, 13, 15, 20	39	3	3	3	3	4	4
AVG-65	-43,694757	-19,823391	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	28,1	4	39	0,3470	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	3	3	3	3	1
AVG-66	-43,692307	-19,824114	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	6,3	1,65	33	3,1746	4	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	3	1
AVG-71	-43,697799	-19,822663	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	14,1	1	18	1,2766	3	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	3	1
Morcego II	-46,261560	-21,638950	Campestre	Gra.	A.F.	A.F.	20	5	26	0,2600	0	7	4	1	2	2	2	2	N
Barra do Jardim	-42,572030	-17,515886	Capelinha	Sil.	C.	C.W.S.	15	5	49	0,6533	0	3, 7, 8	14	2	2	2	2	2	N
S. A. Fanado	-42,437991	-17,591514	Capelinha	Sil.	C.	C.W.S.	10	5	55	1,1000	1	3, 7, 8, 20	20	2	3	2	2	2	N
Cortinas I	-44,607642	-21,511032	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	200	30	36	0,0060	0	7	4	1	2	2	2	2	1
Cortinas II	-44,607110	-21,510406	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	40	10	20	0,0500	0	7	4	1	1	1	1	1	1
Gruta do Céu	-44,653565	-21,469169	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	25	15	25	0,0667	1	3, 7, 13, 20	21	2	3	3	3	2	1
Ponte de Pedra	-44,653293	-21,469972	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	100	30	41	0,0137	0	7	4	2	2	2	2	2	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Espigão I	-44,348604	-16,466653	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	750	16	72	0,006	2	3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	34	3	3	3	3	3	N
Espigão II	-44,347542	-16,467581	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	200	4	40	0,05	0	3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	42	2	3	2	3	3	N
Lapa Cigana	-44,370402	-16,471524	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	150	3	58	0,1289	2	7, 8, 10, 12, 13, 20	32	3	3	3	3	3	N
Maria Cobra	-44,395385	-16,752209	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	500	23,5	87	0,0074	0	7, 8, 11, 17	23	2	2	2	2	2	N
Sumitumba	-44,369000	-16,663000	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	200	12	80	0,0333	3	2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 17, 20	55	4	4	4	4	4	N
Caverna 04	-44,351518	-19,119370	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	60	1	31	0,5167	0	3, 7	9	1	1	1	1	1	1
Gruta 1	-44,355111	-19,126847	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	20	3	52	0,8667	0	3, 7	9	2	2	2	2	2	1
Gruta 2	-44,368090	-19,126847	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	30	8	100	0,4167	2	7, 11, 14, 17	24	3	3	3	3	3	1
Gruta do Meio	-44,311387	-19,172019	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	200	25	113	0,0226	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	2	1
Lagoa da Pedra	-44,358186	-19,081591	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	141	12	42	0,0248	0	3, 5, 7, 8, 14, 17	32	2	2	2	2	2	1
Lapa da Onça	-44,364858	-19,186165	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	144	4	18	0,0833	4	3, 7, 8	14	2	2	2	2	2	1
Lapinha do Atamis	-44,355766	-19,142032	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	120	10	53	0,0442	0	3, 7	9	2	2	2	2	2	1
Maquiné	-44,351116	-19,122568	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	1312	27	67	0,0019	6	3, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 20	51	4	4	4	4	4	1
Tão Lucas	-44,313071	-19,171889	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	224	2	78	0,1741	2	3, 7, 8	14	2	2	2	2	2	1
Antonina I	-44,403056	-18,705144	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	250	21	80	0,0152	3	3, 5, 7, 8, 12, 20	29	3	3	3	3	3	N
Antonina II	-44,402521	-18,706453	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	150	11	64	0,0388	0	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 20	47	3	3	3	3	3	N

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Saco Comprido	-44,409988	-18,667236	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	537	13,5	115	0,0159	3	7, 8, 12, 13, 20	33	4	4	4	4	4	N
Saco Curto	-44,406622	-18,666239	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	50	10	68	0,1360	5	1, 7, 8, 12, 20	27	3	3	3	3	3	N
Santo Amaro I	-44,341913	-19,067138	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	273	12	47	0,0143	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	2	1
Santo Amaro II	-44,341913	-19,067138	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	560	30	51	0,0030	2	3, 7, 8, 13	20	2	2	2	2	2	1
Monte Cristo	-43,561365	-18,297166	Diamantina	Sil.	C.	A.F.	216	35	61	0,0081	3	2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 20	58	3	4	3	4	3	3
Salitre	-43,535989	-18,279555	Diamantina	Sil.	C.	A.F.	593,5	23	50	0,0037	4	3, 7, 10, 11, 12, 13, 20	40	3	4	3	4	3	2
Coqueiros	-45,853424	-20,292662	Dores	Car.	C.	A.F.	90	8	38	0,0528	1	7, 9, 12, 20	18	2	2	2	2	2	1
Buraco dos Curiós	-45,905873	-20,305401	Dores	Car.	C.	A.F.	280	2	72	0,1286	7	3, 7, 12	12	2	2	2	2	2	1
Dico Ramiro	-45,822388	-20,316746	Dores	Car.	C.	A.F.	15,5	0,4	27	4,3548	2	3, 7, 18	14	2	2	2	2	3	2
Fumaça II	-45,814015	-20,318186	Dores	Car.	C.	A.F.	45	5	37	0,4111	6	4, 7	10	2	2	2	2	3	1
Helinho I	-45,846487	-20,309647	Dores	Car.	C.	A.F.	82	6,8	57	0,1022	2	7, 12, 13, 19, 20	25	2	2	2	2	3	1
Helinho II	-45,847074	-20,308388	Dores	Car.	C.	A.F.	76	7,8	54	0,0911	4	7, 12	7	2	2	2	2	3	1
DGN_002	-42,892226	-19,069755	Dores de Guanhães	Gra.	A.F.	A.F.	8	6,5	36	0,6923	0	3, 5, 7, 8	20	2	3	3	2	2	N
DGN_007	-42,896545	-19,036871	Dores de Guanhães	Gra.	A.F.	A.F.	241	7	74	0,4403	0	3, 5, 7, 8	20	2	3	3	3	3	N
DGN_04	-42,867953	-19,042269	Dores de Guanhães	Gra.	M.A.	A.F.	17,75	5	35	0,3944	0	3, 5, 7, 8	20	2	2	2	2	2	N
Lapa Santa	-43,198169	-18,214704	Felício dos Santos	Sil.	M.A.	A.F.	90	13	47	0,0402	1	12, 13, 14, 15, 20	58	3	4	4	4	4	N
Linfonso	-43,217476	-18,170563	Felício dos Santos	Sil.	M.A.	A.F.	15	5	19	0,2533	0	3, 7, 8	14	1	1	1	1	1	N

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Dimas II	-45,661844	-20,467115	Formiga	Car.	C.	C.W.S.	58,5	2,3	53	0,3939	3	7	4	2	2	2	2	1
Paca	-45,659035	-20,473830	Formiga	Car.	C.	C.W.S	400	1,5	38	0,0633	3	7	4	2	2	2	2	3
Taquaril	-46,217094	-15,415692	Formoso	Car.	C.	C.W.S	150	5	79	0,1053	1	7,20	10	2	2	2	2	4
DGN_005	-42,865522	-19,040724	Guanhães	Gra.	M.A.	A.F.	68,43	12,5	72	0,0842	0	3,5,7,8	20	2	3	3	3	N
Cucuruto	-45,476070	-22,051230	Heliodora	Gra.	M.A.	A.F.	45	9	51	0,1259	1	3,7	9	2	3	3	2	1
Do lado do Pedrão	-45,471500	-22,063100	Heliodora	Gra.	M.A.	A.F.	35	8	30	0,1071	0	3,7	9	1	2	2	2	1
Gameleira	-45,471920	-22,063470	Heliodora	Gra.	M.A.	A.F.	20	10	24	0,1200	0	3	5	1	2	2	2	1
Pedrão	-45,471500	-22,063100	Heliodora	Gra.	M.A.	A.F.	40	4	42	0,2625	1	3,7	9	2	3	2	2	1
Baianinho	-44,234100	-15,765600	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	600	11	51	0,0077	3	7,8,12,20	18	2	2	2	2	N
São José I	-44,207798	-15,725375	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	200	36	91	0,0126	0	7,20	10	2	2	2	2	N
São José II	-44,206214	-15,725786	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	150	18	23	0,0085	0	7,8,20	15	2	2	2	2	N
São José III	-44,205272	-15,725886	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	150	24	76	0,0211	2	7,12,20	13	2	2	2	2	N
Peixe	-45,794494	-20,286262	Iguatama	Car.	C.	A.F.	40	5	33	0,1650	1	1,3,4,7	24	2	2	2	2	3
Fornos I	-45,665357	-20,277936	Iguatama	Car.	C.	A.F.	35	3,9	67	0,4883	4	3,7	9	2	2	2	4	1
Cipó	-44,184377	-15,056174	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	200	18	60	0,0167	3	1,7,12,14,20	28	2	3	2	3	1
João Ferreira	-44,132069	-15,009719	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	150	5	29	0,0387	5	7,8,10,11,12,13,14,17,20	52	3	3	3	4	2
Lapa d'água do Zezé	-44,117087	-15,006745	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	300	12	77	0,0214	6	7,8,11,13,14,17,20	41	4	4	4	4	2
Marmelo	-44,129633	-15,011380	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	80	6	27	0,0563	2	7,8,20	15	2	2	2	2	2

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Nestor	-44,121890	-15,012456	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	500	32	69	0,0043	10	7, 8, 10, 12, 20	26	3	3	3	4	2
Buraco da Chuva	-44,563405	-17,088939	Jequitaí	Car.	C.	C.W.S.	40	5	41	0,2050	1	5, 7, 8	15	2	2	2	2	2
Lapa do Dim	-44,562505	-17,087961	Jequitaí	Car.	C.	C.W.S.	450	33	38	0,0026	2	7, 8, 12	12	2	2	2	2	2
Lapa do Sol	-44,564876	-17,090967	Jequitaí	Car.	C.	C.W.S.	25	3,3	38	0,4606	1	7, 8	9	2	2	2	2	2
Lapas da Lagoinha	-44,564849	-17,090244	Jequitaí	Car.	C.	C.W.S.	420	12,7	48	0,0090	0	7, 8, 12, 20	18	2	2	2	2	2
Toca Itajubá	-40,774993	-16,478886	Jequitinhonha	Gra.	M.A.	A.F.	7	2,3	26	1,6149	1	2, 3, 7, 8, 20	26	2	4	4	3	N
Toca Juparanã	-40,923098	-16,417734	Jequitinhonha	Gra.	M.A.	A.F.	65	20,5	58	0,0435	1	3, 4, 5, 7, 8, 2	32	2	4	4	3	N
A204-2	-44,261593	-14,387279	Juvenília	Car.	C.	A.D.F.	45	8	50	0,1389	2	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Taboleirinho	-44,288831	-14,379470	Juvenília	Car.	C.	A.D.F.	2000	40	61	0,0008	5	1, 3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	43	3	4	3	4	1
Feneme	-43,95405	-19,556129	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	26,13	13	27	1,0032	0	3, 7, 2008	14	1	1	1	2	1
Gruta do Grilão	-43,956702	-19,552828	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	42,85	19	26	0,0328	1	N	0	1	1	1	1	1
Gruta do Lixo	-43,950481	-19,558223	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	16,85	16	36	0,1377	1	3, 20	11	1	1	1	1	1
Helictites	-43,963167	-19,559877	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	69,48	10	33	0,0454	1	3, 7, 8, 12	17	2	2	2	2	1
Lagoa Seca	-43,961416	-19,556497	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	28,39	11	19	0,0592	1	3, 7, 2008	14	1	1	1	1	1
Macacos da Caverna	-43,958183	-19,561249	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	42,7	10	48	0,1166	1	3/7	14	2	2	2	2	1
Ninho de pérolas	-43,954801	-19,552539	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	27	47,74	25	0,0192	0	N	0	1	1	1	1	1
Sumidouro	-43,941396	-19,542311	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	138	4,66	33	0,0514	0	3, 7, 8, 11	22	2	2	2	2	1
Varzea	-43,952124	-19,572473	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	134	8,12	55	0,0504	1	3, 7, 8, 12, 13	23	2	2	2	2	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W.	V.	V.	V.	C.	
														U. G.	U. L.	U. B.	U. E. P. A.	
Engenho Velho	-44,639623	-17,947182	Lassance	Car.	C.	C.W.S.	300	10,8	121	0,0373	2	5, 7, 8, 12	18	3	3	3	3	N
Lapa d'água - Lassance	-44,612090	-17,919191	Lassance	Car.	C.	C.W.S.	100	7	67	0,0957	0	4, 5, 7, 8, 12	24	2	2	2	2	N
Beira de Estrada I	-43,898126	-21,712851	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	20	3	29	0,4833	0	3	5	1	2	2	2	1
Beira de Estrada II	-43,89859	-21,71357	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	30	2	28	0,4667	0	3	5	1	2	2	2	1
Catedral I	-43,872046	-21,701486	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	26	5	14	0,1077	0	13	6	1	1	1	1	1
Catedral III	-43,872046	-21,701486	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	170	60	22	0,0022	0	3	5	1	1	1	1	1
Dobras	-43,896608	-21,696294	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	138	10	25	0,0181	0	3	5	1	2	2	2	1
Gnomos	-43,894860	-21,711590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	32	20	22	0,0344	0	3	5	1	1	1	1	1
Grua da Cruz	-43,896249	-21,694923	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	42	10	57	0,1357	0	3, 13, 14	17	2	2	3	3	1
Lagarto Teiu	-43,893929	-21,712168	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	100	10	42	0,0420	1	3	5	2	2	2	2	1
Manequinho	-43,903194	-21,719923	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	160	40	68	0,0106	2	3	5	2	3	4	3	1
Martiniano	-43,900316	-21,715316	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	240	1	35	0,1458	0	3, 13	11	1	2	2	2	1
Monjolinhos	-43,880138	-21,696590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	21	5	21	0,2000	0	3, 13	11	1	1	1	1	1
Ponte de Pedra II	-43,898472	-21,716590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	54	10	31	0,0574	1	13	6	1	2	2	2	1
Apartamento	-44,323164	-15,894507	Lontra	Car.	C.	C.W.S.	200	6,7	101	0,0754	2	5, 7, 8, 11, 12, 20	32	3	3	3	3	1
Joaquim Rodrigues	-44,643736	-16,217050	Luislândia	Car.	C.	C.W.S.	125	23	61	0,0212	5	3, 7, 8, 12, 13, 20	29	3	3	3	3	N
Lapa Sem Firm	-44,627803	-16,148575	Luislândia	Car.	C.	C.W.S.	2200	10	151	0,0069	7	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 20	47	4	4	4	4	1
Serra Grande	-44,820061	-21,559782	Luminárias	Sil.	M.A.	A.F.	213	15	88	0,0275	0	3	5	2	2	3	3	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R. R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	V. U. P.	C. A.
Escadas	-44,06821	-19,516497	Matozinhos	Car.	C.	C.W.S.	1828	15	59	0,0022	3	3, 4, 7, 8, 10, 12, 20	37	3	3	3	3	1
Cachoeira	-45,960415	-19,216306	Matutina	Car.	C.	A.F.	20	13,3	61	0,2293	0	3, 4, 7, 12, 13, 20	30	2	2	2	3	3
Campo de Futebol	-45,964787	-19,21725	Matutina	Car.	C.	A.F.	25	15	42	0,112	0	2, 3, 5, 7, 8, 12, 13, 20	41	2	2	2	3	3
Gruta 9	-45,959865	-19,216553	Matutina	Car.	C.	A.F.	8	1,6	48	3,8217	1	3, 4, 7, 12, 13, 20	30	3	3	3	4	3
Aguiinhas	-42,389391	-17,425826	Minas Novas	Sil.	C.	C.W.S.	13	7	45	0,4945	0	2, 3, 4, 7, 8	26	2	3	2	2	N
Junia	-44,121981	-18,264047	Monjolos	Car.	C.	A.F.	320	8	26	0,0102	0	3, 7, 8, 9, 12, 20	28	2	2	2	2	1
Lapa do Marcelo	-44,102193	-18,276726	Monjolos	Car.	C.	A.F.	700	6	41	0,0098	4	3, 4, 5, 7, 8, 12, 20	35	3	3	3	4	1
Toca do Geraldo	-44,102996	-18,278727	Monjolos	Car.	C.	A.F.	1500	14	37	0,0018	0	2, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 20	43	2	2	2	3	1
Fósseis	-44,315476	-14,360413	MontaVânia	Car.	C.	A.D.F.	120	12	24	0,0375	0	3, 7, 8, 9, 10, 12	30	2	2	2	2	1
Gruta do veado	-44,392976	-14,286846	MontaVânia	Car.	C.	A.D.F.	25	4	57	0,5700	2	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12	35	3	3	3	4	1
Boqueirão da Nascente	-43,941677	-16,712649	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	620	15	70	0,0075	8	7, 11, 14, 17	24	3	3	3	3	1
Cedro	-44,104423	-16,931280	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	389	12	25	0,0054	4	5, 7, 8, 12, 13, 20	30	2	2	2	2	1
Claudina	-43,994084	-16,679251	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	550	18	81	0,0082	4	7, 8, 12, 13, 20	24	3	3	3	3	2
Cristais	-43,940288	-16,704291	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	200	4	43	0,0538	4	3, 7, 13	15	2	2	2	2	2
Encantada	-43,994569	-16,331289	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	2200	23	84	0,0017	4	4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 17, 20	50	4	4	4	4	2

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R. R.R.	T. R.	Impactos W,	I. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.		
Lapa da Santa	-43,992281	-16,681556	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	800	7	57	0,0102	3	7, 8, 12, 13, 20	24	2	2	2	2	
Lapa d'água MOC	-43,920924	-16,707038	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	1234	12	104	0,0070	10	7, 9, 12, 13, 20	24	4	4	4	4	1
Lapa Grande	-43,942910	-16,706672	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	2100	23,5	57	0,0012	6	7, 10, 12, 13, 20	27	3	3	3	3	2
SPT_316	-43,390223	-19,221419	Morro do Pilar	Fer.	C.	C.W.S.	78,6	7	45	0,0818	4	3, 7	9	2	3	2	2	1
Jaime	-46,320528	-22,613998	Munhoz	Gra.	M.A.	A.F.	30	1	38	1,2667	1	7	4	2	3	3	2	1
Labirinto	-46,322103	-22,614420	Munhoz	Gra.	M.A.	A.F.	50	3	60	0,4000	5	7, 12	7	2	4	4	2	1
Zé Capucho	-41,222430	-17,316505	Novo O. de Minas	Gra.	M.A.	A.F.	150	13	49	0,0251	2	3, 7, 8, 11	22	2	4	4	3	3
Cerâmicas	-45,597544	-20,404295	Pains	Car.	C.	A.F.	80	28	75	0,0335	4	4, 7, 8, 13, 19	27	3	3	3	4	1
Borboleta Azul	-45,690270	-20,326751	Pains	Car.	C.	C.W.S.	60	13	31	0,0397	3	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Capoeirão	-45,782537	-20,340395	Pains	Car.	C.	A.F.	170	25	37	0,0087	2	1, 7	13	2	2	2	2	1
Cavalinho	-45,796326	-20,301795	Pains	Car.	C.	A.F.	250	10	60	0,0240	5	7	4	2	2	2	3	3
Cinderela	-45,600381	-20,446149	Pains	Car.	C.	A.F.	98,9	1	40	0,4044	4	1, 3, 7, 12, 14, 20	33	3	3	3	4	1
Coelho	-45,684967	-20,414527	Pains	Car.	C.	C.W.S.	15	6,6	56	0,5657	1	7, 20	10	2	2	2	2	1
Cornélio III	-45,669725	-20,300708	Pains	Car.	C.	A.F.	37,8	6	44	0,1940	6	7	4	2	2	2	3	1
Cristais	-45,633244	-20,425268	Pains	Car.	C.	A.F.	50	10	56	0,1120	2	7, 8, 9, 13, 14, 17, 20	38	3	3	3	4	1
Duas Bocas	-45,678148	-20,367478	Pains	Car.	C.	A.F.	35	7	41	0,1673	3	1, 7	13	2	2	2	2	1
Fazenda Amargoso	-45,592622	-20,397860	Pains	Car.	C.	A.F.	200	9	67	0,0372	4	4, 7, 20	16	2	2	2	4	1
Físico	-45,669343	-20,401034	Pains	Car.	C.	A.F.	45	3	59	0,4370	2	7	4	2	2	2	3	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Isaias	-45,657309	-20,367874	Pains	Car.	C.	A.F.	200	12,9	61	0,0236	5	3, 7, 9, 12, 13, 20	29	3	3	3	4	1
L. dos Negros III	-45,659638	-20,435462	Pains	Car.	C.	C.W.S.	57	5,9	40	0,1189	3	7	4	2	2	2	2	1
Lanchonete da Coruja	-45,803121	-20,325049	Pains	Car.	C.	A.F.	110	18,4	69	0,0341	4	7, 8	9	2	2	2	4	1
Macacaos III	-45,671894	-20,407901	Pains	Car.	C.	C.W.S.	138	10,9	54	0,0361	1	7	4	2	2	2	2	1
Olhos D'Água	-45,684666	-20,311620	Pains	Car.	C.	A.F.	149	4,6	73	0,1060	5	4, 7, 12, 13, 20	25	3	3	3	4	1
Paranoá	-45,669016	-20,365064	Pains	Car.	C.	A.F.	249	21,9	88	0,0162	4	1, 2, 7, 9, 12, 13	33	3	3	3	4	1
Ponte Velha I	-45,690531	-20,415536	Pains	Car.	C.	C.W.S.	92	5,3	61	0,1251	4	7, 18, 20	15	2	2	2	2	1
Serra Azul	-45,646763	-20,375548	Pains	Car.	C.	A.F.	493	0,3	60	0,4057	7	4, 7	10	2	2	2	4	1
Tio Rafa I	-45,664690	-20,413178	Pains	Car.	C.	C.W.S.	76	7,6	56	0,0971	1	7	4	2	2	2	2	1
Tio Rafa II	-45,664690	-20,413178	Pains	Car.	C.	C.W.S.	179	18,8	73	0,0216	2	7	4	2	2	2	2	1
Zé Erpídio	-45,678617	-20,415483	Pains	Car.	C.	C.W.S.	32	4	53	0,4141	1	7	4	2	2	2	2	1
Zé Serafim	-45,656786	-20,413976	Pains	Car.	C.	C.W.S.	63	9,9	50	0,0802	3	3, 7, 12, 13, 20	24	2	2	2	2	1
Zizinho Beraldo	-45,834085	-20,356303	Pains	Car.	C.	C.W.S.	268	7	71	0,0378	6	7, 8, 9, 12, 13, 20	29	3	3	3	3	1
Brocotó	-46,805407	-17,324402	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	30	4,5	73	0,5407	0	3, 7, 8, 20	20	2	2	2	2	3
Brocotó II	-46,805102	-17,323005	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	60	5	73	0,2433	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	3
Cava	-46,903326	-16,883648	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	38	3,3	48	0,3828	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	4
Lagoa Rica	-46,793076	-17,151218	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	200	5	56	0,0560	7	1, 2, 3, 7, 9, 10, 12, 13, 20	52	4	4	4	4	4
Santo Antonio	-46,818493	-17,125511	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	67	13,75	51	0,0554	2	3	5	2	2	2	2	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V.	V.	V.	C.	
														U. G.	U. L.	U. B.	U. P. E. A.	
Caverna do Diabo	-45,906500	-22,656800	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	41	6	45	0,1829	2	7,20	10	2	3	3	3	1
Goulart	-45,779200	-22,593200	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	34	20	48	0,0706	0	3,7,12,13,20	24	2	3	3	3	1
Machadão	-45,812100	-22,571300	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	50	3	57	0,3800	0	3,7	9	2	3	2	2	1
Pacas P.L.	-43,967326	-19,561021	Pedro Leopoldo	Car.	C.	C.W.S.	319,6	9,4	34	0,0113	1	3,7,8,12,13	23	2	2	2	2	N
Marinheiros	-45,812731	-20,400425	Pimenta	Car.	C.	C.W.S.	200	18	89	0,0247	4	7,12,13,14,19,20	31	3	3	3	3	3
Lapa d'água PJ	-44,128192	-18,563372	Pres. Juscelino	Car.	C.	C.W.S.	600	11	64	0,0097	8	3,7,8,12	17	3	3	3	3	N
Cateira	-46,087531	-18,31695	Pres. Olegario	Car.	C.	C.W.S.	200	22	61	0,0139	2	2,3,7,13	21	2	2	2	2	1
Juruva	-46,081183	-18,321658	Pres. Olegario	Car.	C.	C.W.S.	250	15	110	0,0293	1	2,3,7,13	21	2	2	2	2	1
Tauá	-46,413427	-17,944806	Pres. Olegario	Car.	C.	C.W.S.	26	15,36	22	0,0551	0	3,13	11	1	1	1	1	3
Vereda da Palha	-46,126011	-18,255221	Pres. Olegario	Car.	C.	C.W.S.	250	14	117	0,0334	3	2,3,7,13	21	3	3	3	3	1
Boca Larga	-42,750284	-16,073615	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	13,20	8,80	24	0,2066	0	3	5	1	2	1	1	2
Chaminé	-42,721824	-16,085872	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	47,40	11,27	16	0,0300	0	7,8	9	1	2	1	1	2
Gameleira	-42,721685	-16,085762	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	7,60	7,80	18	0,3036	0	3,7	9	1	2	1	1	2
Lago	-42,722937	-16,082709	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	98	10	27	0,0276	4	3,7,8	14	2	3	2	2	2
Mandaçaia	-42,722554	-16,082519	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	44,45	14,11	36	0,0574	1	7,8	9	1	2	1	1	2
Mercedes 1	-42,720667	-16,086510	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	16,54	9,40	13	0,0836	0	3,7,8	14	1	2	1	1	2

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V.	V.	V.	V.	C.	
														U. G.	U. L.	U. B.	U. E.	U. P.	A.
Mercedes 2	-42,720865	-16,087163	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	5	7,10	21	0,5915	0	3, 7, 8	14	1	2	1	1	1	2
Morro do Capim	-42,750604	-16,073429	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	9,40	7,85	24	0,3252	1	3	5	1	2	1	1	1	2
Morro Grande	-42,784466	-16,141209	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	94	3	40	0,1418	4	2, 3, 4, 7, 8	26	2	4	2	2	2	1
Paleotoca 1	-42,721555	-16,112692	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	24	3	27	0,3750	0	3	5	1	2	1	1	1	2
Paleotoca 2	-42,722139	-16,113086	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	17,13	12	11	0,0535	0	N	0	1	1	1	1	1	2
Paleotoca 3	-42,722016	-16,113284	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	22,46	3,75	10	0,1189	0	N	0	1	1	1	1	1	2
Paleotoca 4	-42,721475	-16,113179	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	9	5,71	22	0,4278	0	3	5	1	2	1	1	1	2
Paleotoca 5	-42,721258	-16,113357	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	5	3	19	1,2667	0	3	5	2	2	2	2	2	2
Coruja branca	-42,692492	-16,084292	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	4	2,30	11	1,1957	0	3, 7	9	2	2	2	2	2	4
João de Rita 1	-42,714617	-16,046839	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	36	11,95	42	0,0976	1	N	0	2	2	2	2	2	1
João de Rita 2	-42,714769	-16,046597	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	9	10,60	32	0,3354	0	N	0	1	2	1	1	1	1
Maritacas	-42,693150	-16,083956	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	37,13	135	42	0,0867	2	7	4	2	2	2	2	2	4
Mocororô	-42,703600	-16,010200	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	84	4	28	0,0833	2	3, 7, 8, 12	17	2	3	2	2	2	1
Nilson	-42,709297	-16,020231	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	10,10	9,80	20	0,2021	0	3	5	1	1	1	1	1	1
AVG-05	-43,694590	-19,822884	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	77,2	10,56	48	0,0589	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	3	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
AVG-08	-43,705539	-19,823081	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	76,6	12,3	45	0,0478	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-27	-43,696550	-19,822455	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	22,2	1,3	29	1,0049	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-30	-43,696867	-19,822304	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	74,1	5,2	71	0,1843	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-38	-43,695194	-19,822472	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	16,5	4,1	47	0,6948	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-41	-43,695426	-19,822194	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	26,2	6,1	41	0,2565	3	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-47	-43,695782	-19,822965	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	32,5	1,2	39	1,0000	4	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-48	-43,695707	-19,822865	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	15,3	1,3	27	1,3575	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-50	-43,698522	-19,820690	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	62,3	8,2	36	0,0705	2	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-51	-43,698123	-19,820407	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	25,9	7,3	21	0,1111	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-64	-43,698462	-19,821060	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	28,1	9,5	20	0,0749	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-75	-43,687935	-19,821696	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	35,6	5,3	33	0,1749	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
Gand_0073	-43,658474	-20,040057	Santa Bárbara	Fer.	M.A.	A.F.	350	1,8	86	0,1365	4	3	5	2	3	4	4	1
Gand_0114	-43,670630	-20,068469	Santa Bárbara	Fer.	M.A.	A.F.	270	6,3	37	0,0218	4	3	5	2	3	3	3	1
Viola	-43,616758	-19,295742	Santana do Riacho	Car.	C.	C.W.S.	604	8	43	0,0089	3	3, 7, 12, 20	18	2	2	2	2	1
Mãe de Ná	-44,001946	-15,806895	São João da Ponte	Car.	C.	A.D.F.	150	3	29	0,0644	1	3, 7, 8, 9, 10, 20	33	2	2	2	2	N
Boa Vista	-42,49997	-17,961298	São S. do Maranhao	Sil.	M.A.	A.F.	28	9	46	0,1825	0	3, 7, 8, 20	20	2	2	3	3	N
Córrego das Canoas	-42,744876	-16,016154	Serranópolis de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	28	6	23	0,1369	0	3	5	1	2	1	1	2
Fugitivos	-43,883096	-21,677731	Sta. Rita do Ibitipoca	Sil.	M.A.	A.F.	440	40	52	0,0030	0	3, 13	11	2	2	2	2	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Captação	-42,787133	-17,275379	Turmalina	Sil.	C.	C.W.S.	17	6	25	0,2451	1	3, 7, 8, 12, 20	23	2	2	2	2	1
Barth Caverna	-47,067706	-16,416107	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	160	14	46	0,0205	2	2, 3, 7, 8, 9	25	2	2	2	2	2
Deus Me Livre	-47,060501	-16,425303	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	50	9	108	0,24	0	3, 7, 13	15	2	2	2	2	4
Frangas	-47,067519	-16,420563	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	13	3	40	1,0256	0	3	5	2	2	2	2	2
Mata dos Paulista	-47,069803	-16,4197	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	30	2	63	1,4	0	3, 7	9	2	2	2	2	3
Nilsinho	-44,706553	-16,214083	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	60	2	93	0,775	0	2, 3, 4, 7, 8, 20	32	3	3	3	3	N
Sapezal	-46,896032	-16,800507	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	130	15	70	0,0359	1	3, 12, 13, 20	20	2	2	2	2	1
Zezinho de Dionila	-44,707148	-16,215654	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	20	1	33	1,65	0	2, 3, 4, 7, 8, 20	32	2	2	2	2	N
Gameleira	-43,977195	-15,623442	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	250	2	32	0,064	1	7, 8, 10, 12, 15,	31	2	2	2	2	3
Indio	-43,9656	-15,6228	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	600	2	27	0,0225	1	5, 7, 10, 13, 20	30	2	2	2	2	3
Madeira	-43,965252	-15,62166	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	400	20	12	0,0015	0	5, 7, 8, 10, 13, 20	35	2	2	2	2	3
Morrinho	-43,973832	-15,622715	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	350	9,5	36	0,0108	5	3, 7, 9, 12, 20	23	2	2	2	3	3
Porteira	-43,976243	-15,623438	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	150	4	28	0,0467	1	7, 8, 10, 12, 20	26	2	2	2	2	3
Zé Avelino I	-44,054907	-15,607221	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	2.100	23	114	0,0024	5	2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 20	55	4	4	4	4	3
Abrigo da Escarpa	-46,813028	-17,927781	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	4	10	39	0,975	0	2, 3, 7, 8, 10	28	2	2	2	3	4
Delza	-46,906305	-17,984909	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	1400	4	48	0,0086	7	3, 7, 12, 13, 20	24	3	3	3	3	1

Caverna	Long.	Lat.	Município	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S..	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impactos	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	V. U. C.	
Escarpa	-46,813523	-17,927243	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	63,3	3	66	0,3476	0	2, 3, 7, 8, 10, 12	31	2	2	2	2	4
Guardião Severino	-46,88847	-17,988327	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	50	15	48	0,064	0	2, 3, 2007	15	2	2	2	2	1
Lapa Nova	-46,891002	-17,983206	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	4000	45	148	0,0008	7	2, 3, 7, 9, 12, 13, 14, 20	41	4	4	4	4	1
Lapa Nova II	-46,891707	-17,983805	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	600	4,5	55	0,0204	4	2, 3, 7, 13	21	2	2	2	2	1
Mata Velha	-46,892714	-18,012688	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	160	7	60	0,0536	0	7, 13, 20	16	2	2	2	2	1
Não Cadastrada	-46,810461	-17,922266	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	18,4	2	49	1,3315	2	3, 7, 8, 15, 20	25	3	3	3	3	4
Urtigas	-46,810804	-17,920682	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	368,5	30	75	0,0068	3	2, 3, 7, 8, 20	26	3	3	3	3	1
V01	-46,8249	-17,925809	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	5	2	15	1,5000	0	3, 7, 13	15	2	2	2	2	3
Vaca Morta	-46,827359	-17,928171	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	16,1	7	73	0,6477	0	2, 3, 7, 8	20	2	2	2	2	3

APPENDICES

Appendix 1

Caves characterization in terms of the application of the Cave Vulnerability index modified by Simões and collaborators (2014). Name of the cave (Cave); geographic coordinates (Datum: WGS84) in decimal degrees Longitude (Long.) and Latitude (Lat.); municipality of occurrence (Municipality); lithology in which it is inserted (Lit.) which can be carbonate (Car.), siliciclastic (Sil.), ferruginous (Fer.) or granitoid (Gra.); Biome (Bio.) which can be Cerrado (C.) or Atlantic Forest (A.F.); Ecoregion (Ecor.) can be Atlantic Dry Forests (A.D.F.), Atlantic Forests (A.F.) or Cerrado Woodlands and Savannas (C.W.S.); linear development sampled (L.D.S.) reported in meters; sum of the length of the entrances (E.E.) reported in meters, total richness of species found (R.), relative richness according to the CVi-m methodology (R.R.), richness of species considered troglobitic (T.R.), impacts observed according to the reference number presented in Appendix 3 (Impacts), sum obtained for the weights of the impacts assigned according to Appendix 3 (I.W.), degree of vulnerability of the cave by applying the CVi-m on a general scale (VU.G.), degree of vulnerability of the cave obtained by applying the CVi-m considering the different lithologies (VU. L.), degree of vulnerability of the cave by applying the CVi-m considering the different biomes (VU.B.), degree of vulnerability of the cave considering the different ecoregions (VU.E.), inclusion of the cave in the priority areas proposed by the CECAV (C.P.A.) stating the category of the area in which they fall (1, 2, 3 or 4) or not falling into any of the categories (N).

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Cachorros	-44,367739	-21,772617	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	20	5	25	0,2500	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Joao Japones I	-44,366253	-21,773976	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	10	46	0,1150	0	7	4	2	2	2	2	1
Joao Japones II	-44,365331	-21,774704	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	4	30	0,1875	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Joao Japones IV	-44,366166	-21,773975	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	40	4	29	0,1813	0	3,7	9	1	2	2	1	1
Novatos	-44,320526	-21,785557	Andrelândia	Sil.	A.F.	A.F.	15	5	26	0,3467	0	7,13	10	1	2	2	2	1
Toca da Passagem	-44,366595	-21,773290	Andrelândia	Sil.	A.F.	C.W.S.	12	6	12	0,1667	0	7	4	1	1	1	1	1
Alinhamento	-45,637589	-20,264666	Arcos	Car.	C.	A.F.	230	10	28	0,0122	2	3,7,8	14	2	2	2	2	3
Gruta Branca	-45,596693	-20,284789	Arcos	Car.	C.	A.F.	200	5	60	0,0600	2	7	4	2	2	2	3	1
Zé Colméia	-45,596039	-20,281583	Arcos	Car.	C.	A.F.	8	4	56	1,7500	2	7	4	2	2	2	3	1
Lapa da Camila	-46,370321	-15,910298	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	120	5	116	0,1933	4	2,3,7	15	3	3	3	3	4
Lapa da Capa	-46,329445	-15,948045	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	480	17	112	0,0137	1	N	0	2	2	2	2	N
Lapa da Marcela	-46,361448	-15,911692	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	400	125	94	0,0019	1	2,6,7,8	19	2	2	2	2	4
Lapa da Suindara	-46,362388	-15,914036	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	160	16,9	56	0,0207	1	2,3,5,7	21	2	2	2	2	4
Lapa do Salobo	-46,218661	-15,489361	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	40	6,8	52	0,1912	2	2,3,7,12,13	30	3	3	3	3	4
Velho Juca	-46,362901	-15,912514	Arinos	Car.	C.	C.W.S.	70	7,2	47	0,0933	2	2,3,5,7	21	2	2	2	2	4
João Matias	-40, 980060	-18,129753	Ataléia	Gra.	A.F.	A.F.	190	10	24	0,0126	1	3,4,7,8,12, 20	29	2	3	3	2	3
Senhor do Bonfim	-41, 292654	-18,194022	Ataléia	Gra.	A.F.	A.F.	203	10	55	0,0271	0	3,4,7,8,12, 13,14,20	41	2	4	3	3	N
C. S. Francisco	-45,922061	-20,308894	BambuÍ	Car.	C.	C.W.S.	70	5	21	0,0600	1	3,4,7,8	20	2	2	2	2	3
Gruta Mamoneiras	-44,493255	-16,400322	Brasília de Minas	Car.	C.	C.W.S.	450	5,5	57	0,0230	2	3,7,8,9,12, 13,20	34	3	3	3	3	N

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Lapa da lagoa	-44,130059	-17,938170	Buenópolis	Car.	C.	C.W.S.	80	4,5	70	0,1944	2	7, 8, 9, 12, 13, 20	23	2	2	2	2	N
Lapa do Coronel	-44,129680	-17,883887	Buenópolis	Car.	C.	C.W.S.	40	8	40	0,1250	0	7, 8, 9, 13, 20	21	2	2	2	2	N
SPT_129	-43,365394	-19,090793	C. Mato Dentro	Fer.	A.F.	A.F.	67	11	55	0,0746	0	3, 7	9	2	2	2	2	1
SPT_151	-43,364456	-19,092528	C. Mato Dentro	Fer.	A.F.	A.F.	85	6,3	44	0,0822	1	3, 4, 5, 7	21	2	3	3	2	1
SPT_583	-43,264619	-19,173095	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	150	8,4	46	0,0364	1	3, 7	9	2	2	3	2	N
SPT_584	-43,264644	-19,166202	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	63	12,3	28	0,0361	0	3, 7	9	1	2	2	2	N
SPT_585	-43,264843	-19,174425	C. Mato Dentro	Sil.	A.F.	A.F.	117	8	46	0,0516	2	3, 7	9	2	3	3	3	N
Gruta do Caído	-47,246102	-16,208907	Cabeceira Grande	Car.	C.	C.W.S.	400	30	69	0,0058	2	3, 4, 11, 12, 13, 15, 20	39	3	3	3	4	
AVG-65	-43,694757	-19,823391	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	28,1	4	39	0,3470	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	3	3	1	
AVG-66	-43,692307	-19,824114	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	6,3	1,65	33	3,1746	4	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	1	
AVG-71	-43,697799	-19,822663	Caeté	Fer.	C.	C.W.S.	14,1	1	18	1,2766	3	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	1	
Morcego II	-46,261560	-21,638950	Campestre	Gra.	A.F.	A.F.	20	5	26	0,2600	0	7	4	1	2	2	2	N
Barra do Jardim	-42,572030	-17,515886	Capelinha	Sil.	C.	C.W.S.	15	5	49	0,6533	0	3, 7, 8	14	2	2	2	2	N
S. A. Fanado	-42,437991	-17,591514	Capelinha	Sil.	C.	C.W.S.	10	5	55	1,1000	1	3, 7, 8, 20	20	2	3	2	2	N
Cortinas I	-44,607642	-21,511032	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	200	30	36	0,0060	0	7	4	1	2	2	2	1
Cortinas II	-44,607110	-21,510406	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	40	10	20	0,0500	0	7	4	1	1	1	1	1
Gruta do Céu	-44,653565	-21,469169	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	25	15	25	0,0667	1	3, 7, 13, 20	21	2	3	3	2	1
Ponte de Pedra	-44,653293	-21,469972	Carrancas	Sil.	A.F.	A.F.	100	30	41	0,0137	0	7	4	2	2	2	2	1

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W,	V.	V.	V.	C.	
														U. G.	U. L.	U. B.	U. P.	V. U.
Espigão I	-44,348604	-16,466653	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	750	16	72	0,006	2	3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	34	3	3	3	3	N
Espigão II	-44,347542	-16,467581	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	200	4	40	0,05	0	3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	42	2	3	2	3	N
Lapa Cigana	-44,370402	-16,471524	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	150	3	58	0,1289	2	7, 8, 10, 12, 13, 20	32	3	3	3	3	N
Maria Cobra	-44,395385	-16,752209	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	500	23,5	87	0,0074	0	7, 8, 11, 17	23	2	2	2	2	N
Sumitumba	-44,369000	-16,663000	Coração de Jesus	Car.	C.	C.W.S.	200	12	80	0,0333	3	2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 17, 20	55	4	4	4	4	N
Caverna 04	-44,351518	-19,119370	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	60	1	31	0,5167	0	3, 7	9	1	1	1	1	1
Grua 1	-44,355111	-19,126847	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	20	3	52	0,8667	0	3, 7	9	2	2	2	2	1
Grua 2	-44,368090	-19,126847	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	30	8	100	0,4167	2	7, 11, 14, 17	24	3	3	3	3	1
Grua do Meio	-44,311387	-19,172019	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	200	25	113	0,0226	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Lagoa da Pedra	-44,358186	-19,081591	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	141	12	42	0,0248	0	3, 5, 7, 8, 14, 17	32	2	2	2	2	1
Lapa da Onça	-44,364858	-19,186165	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	144	4	18	0,0833	4	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Lapinha do Atamis	-44,355766	-19,142032	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	120	10	53	0,0442	0	3, 7	9	2	2	2	2	1
Maquiné	-44,351116	-19,122568	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	1312	27	67	0,0019	6	3, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 20	51	4	4	4	4	1
Tão Lucas	-44,313071	-19,171889	Cordisburgo	Car.	C.	C.W.S.	224	2	78	0,1741	2	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Antonina I	-44,403056	-18,705144	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	250	21	80	0,0152	3	3, 5, 7, 8, 12, 20	29	3	3	3	3	N
Antonina II	-44,402521	-18,706453	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	150	11	64	0,0388	0	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 20	47	3	3	3	3	N

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Saco Comprido	-44,409988	-18,667236	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	537	13,5	115	0,0159	3	7, 8, 12, 13, 20	33	4	4	4	4	N
Saco Curto	-44,406622	-18,666239	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	50	10	68	0,1360	5	1, 7, 8, 12, 20	27	3	3	3	3	N
Santo Amaro I	-44,341913	-19,067138	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	273	12	47	0,0143	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Santo Amaro II	-44,341913	-19,067138	Curvelo	Car.	C.	C.W.S.	560	30	51	0,0030	2	3, 7, 8, 13	20	2	2	2	2	1
Monte Cristo	-43,561365	-18,297166	Diamantina	Sil.	C.	A.F.	216	35	61	0,0081	3	2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 20	58	3	4	3	4	3
Salitre	-43,535989	-18,279555	Diamantina	Sil.	C.	A.F.	593,5	23	50	0,0037	4	3, 7, 10, 11, 12, 13, 20	40	3	4	3	4	2
Coqueiros	-45,853424	-20,292662	Dores	Car.	C.	A.F.	90	8	38	0,0528	1	7, 9, 12, 20	18	2	2	2	2	1
Buraco dos Curíós	-45,905873	-20,305401	Dores	Car.	C.	A.F.	280	2	72	0,1286	7	3, 7, 12	12	2	2	2	4	1
Dico Ramiro	-45,822388	-20,316746	Dores	Car.	C.	A.F.	15,5	0,4	27	4,3548	2	3, 7, 18	14	2	2	2	3	2
Fumaça II	-45,814015	-20,318186	Dores	Car.	C.	A.F.	45	5	37	0,4111	6	4, 7	10	2	2	2	3	1
Helinho I	-45,846487	-20,309647	Dores	Car.	C.	A.F.	82	6,8	57	0,1022	2	7, 12, 13, 19, 20	25	2	2	2	3	1
Helinho II	-45,847074	-20,308388	Dores	Car.	C.	A.F.	76	7,8	54	0,0911	4	7, 12	7	2	2	2	3	1
DGN_002	-42,892226	-19,069755	Dores de Guanhães	Gra.	A.F.	A.F.	8	6,5	36	0,6923	0	3, 5, 7, 8	20	2	3	3	2	N
DGN_007	-42,896545	-19,036871	Dores de Guanhães	Gra.	A.F.	A.F.	241	7	74	0,4403	0	3, 5, 7, 8	20	2	3	3	3	N
DGN_04	-42,867953	-19,042269	Dores de Guanhães	Gra.	M.A.	A.F.	17,75	5	35	0,3944	0	3, 5, 7, 8	20	2	2	2	2	N
Lapa Santa	-43,198169	-18,214704	Felício dos Santos	Sil.	M.A.	A.F.	90	13	47	0,0402	1	12, 13, 14, 15, 20	58	3	4	4	4	N
Linfonso	-43,217476	-18,170563	Felício dos Santos	Sil.	M.A.	A.F.	15	5	19	0,2533	0	3, 7, 8	14	1	1	1	1	N

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Dimas II	-45,661844	-20,467115	Formiga	Car.	C.	C.W.S.	58,5	2,3	53	0,3939	3	7	4	2	2	2	2	1
Paca	-45,659035	-20,473830	Formiga	Car.	C.	C.W.S.	400	1,5	38	0,0633	3	7	4	2	2	2	2	3
Taquaril	-46,217094	-15,415692	Formoso	Car.	C.	C.W.S.	150	5	79	0,1053	1	7,20	10	2	2	2	2	4
DGN_005	-42,865522	-19,040724	Guanhães	Gra.	M.A.	A.F.	68,43	12,5	72	0,0842	0	3,5,7,8	20	2	3	3	3	N
Cucuruto	-45,476070	-22,051230	Heliadora	Gra.	M.A.	A.F.	45	9	51	0,1259	1	3,7	9	2	3	3	2	1
Do lado do Pedrão	-45,471500	-22,063100	Heliadora	Gra.	M.A.	A.F.	35	8	30	0,1071	0	3,7	9	1	2	2	2	1
Gameleira	-45,471920	-22,063470	Heliadora	Gra.	M.A.	A.F.	20	10	24	0,1200	0	3	5	1	2	2	2	1
Pedrão	-45,471500	-22,063100	Heliadora	Gra.	M.A.	A.F.	40	4	42	0,2625	1	3,7	9	2	3	2	2	1
Baianinho	-44,234100	-15,765600	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	600	11	51	0,0077	3	7,8,12,20	18	2	2	2	2	N
São José I	-44,207798	-15,725375	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	200	36	91	0,0126	0	7,20	10	2	2	2	2	N
São José II	-44,206214	-15,725786	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	150	18	23	0,0085	0	7,8,20	15	2	2	2	2	N
São José III	-44,205272	-15,725886	Ibiracatú	Car.	C.	C.W.S.	150	24	76	0,0211	2	7,12,20	13	2	2	2	2	N
Peixe	-45,794494	-20,286262	Iguatama	Car.	C.	A.F.	40	5	33	0,1650	1	1,3,4,7	24	2	2	2	2	3
Fornos I	-45,665357	-20,277936	Iguatama	Car.	C.	A.F.	35	3,9	67	0,4883	4	3,7	9	2	2	2	4	1
Cipó	-44,184377	-15,056174	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	200	18	60	0,0167	3	1,7,12,14,20	28	2	3	2	3	1
João Ferreira	-44,132069	-15,009719	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	150	5	29	0,0387	5	7,8,10,11,12,13,14,17,20	52	3	3	3	4	2
Lapa d'água do Zezé	-44,117087	-15,006745	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	300	12	77	0,0214	6	7,8,11,13,14,17,20	41	4	4	4	4	2
Marmelo	-44,129633	-15,011380	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	80	6	27	0,0563	2	7,8,20	15	2	2	2	2	2

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. L.	V. U. L.	V. U. L.	C. P. A.
Nestor	-44,121890	-15,012456	Itacarambí	Car.	C.	A.D.F.	500	32	69	0,0043	10	7, 8, 10, 12, 20	26	3	3	3	4	2
Buraco da Chuva	-44,563405	-17,088939	Jequitaiá	Car.	C.	C.W.S.	40	5	41	0,2050	1	5, 7, 8	15	2	2	2	2	2
Lapa do Dim	-44,562505	-17,087961	Jequitaiá	Car.	C.	C.W.S.	450	33	38	0,0026	2	7, 8, 12	12	2	2	2	2	2
Lapa do Sol	-44,564876	-17,090967	Jequitaiá	Car.	C.	C.W.S.	25	3,3	38	0,4606	1	7, 8	9	2	2	2	2	2
Lapas da Lagoinha	-44,564849	-17,090244	Jequitaiá	Car.	C.	C.W.S.	420	12,7	48	0,0090	0	7, 8, 12, 20	18	2	2	2	2	2
Toca Itajubá	-40,774993	-16,478886	Jequitinhonha	Gra.	M.A.	A.F.	7	2,3	26	1,6149	1	2, 3, 7, 8, 20	26	2	4	4	3	N
Toca Juparanã	-40,923098	-16,417734	Jequitinhonha	Gra.	M.A.	A.F.	65	20,5	58	0,0435	1	3, 4, 5, 7, 8, 2	32	2	4	4	3	N
A204-2	-44,261593	-14,387279	Juvenília	Car.	C.	A.D.F.	45	8	50	0,1389	2	3, 7, 8	14	2	2	2	2	1
Taboleirinho	-44,288831	-14,379470	Juvenília	Car.	C.	A.D.F.	2000	40	61	0,0008	5	1, 3, 7, 8, 9, 12, 13, 20	43	3	4	3	4	1
Feneme	-43,95405	-19,556129	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	26,13	13	27	1,0032	0	3, 7, 2008	14	1	1	1	2	1
Gruta do Grilão	-43,956702	-19,552828	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	42,85	19	26	0,0328	1	N	0	1	1	1	1	1
Gruta do Lixo	-43,950481	-19,558223	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	16,85	16	36	0,1377	1	3, 20	11	1	1	1	1	1
Helictites	-43,963167	-19,559877	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	69,48	10	33	0,0454	1	3, 7, 8, 12	17	2	2	2	2	1
Lagoa Seca	-43,961416	-19,556497	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	28,39	11	19	0,0592	1	3, 7, 2008	14	1	1	1	1	1
Macacos da Caverna	-43,958183	-19,561249	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	42,7	10	48	0,1166	1	3/7	14	2	2	2	2	1
Ninho de pérolas	-43,954801	-19,552539	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	27	47,74	25	0,0192	0	N	0	1	1	1	1	1
Sumidouro	-43,941396	-19,542311	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	138	4,66	33	0,0514	0	3, 7, 8, 11	22	2	2	2	2	1
Varzea	-43,952124	-19,572473	Lagoa Santa	Car.	C.	C.W.S.	134	8,12	55	0,0504	1	3, 7, 8, 12, 13	23	2	2	2	2	1

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Engenho Velho	-44,639623	-17,947182	Lassance	Car.	C.	C.W.S.	300	10,8	121	0,0373	2	5, 7, 8, 12	18	3	3	3	3	N
Lapa d'água - Lassance	-44,612090	-17,919191	Lassance	Car.	C.	C.W.S.	100	7	67	0,0957	0	4, 5, 7, 8, 12	24	2	2	2	2	N
Beira de Estrada I	-43,898126	-21,712851	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	20	3	29	0,4833	0	3	5	1	2	2	2	1
Beira de Estrada II	-43,89859	-21,71357	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	30	2	28	0,4667	0	3	5	1	2	2	2	1
Catedral I	-43,872046	-21,701486	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	26	5	14	0,1077	0	13	6	1	1	1	1	1
Catedral III	-43,872046	-21,701486	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	170	60	22	0,0022	0	3	5	1	1	1	1	1
Dobras	-43,896608	-21,696294	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	138	10	25	0,0181	0	3	5	1	2	2	2	1
Gnomos	-43,894860	-21,711590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	32	20	22	0,0344	0	3	5	1	1	1	1	1
Gruta da Cruz	-43,896249	-21,694923	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	42	10	57	0,1357	0	3, 13, 14	17	2	2	3	3	1
Lagarto Teiu	-43,893929	-21,712168	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	100	10	42	0,0420	1	3	5	2	2	2	2	1
Manequinho	-43,903194	-21,719923	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	160	40	68	0,0106	2	3	5	2	3	4	3	1
Martiniano	-43,900316	-21,715316	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	240	1	35	0,1458	0	3, 13	11	1	2	2	2	1
Monjolinhos	-43,880138	-21,696590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	21	5	21	0,2000	0	3, 13	11	1	1	1	1	1
Ponte de Pedra II	-43,898472	-21,716590	Lima Duarte	Sil.	M.A.	A.F.	54	10	31	0,0574	1	13	6	1	2	2	2	1
Apartamento	-44,323164	-15,894507	Lontra	Car.	C.	C.W.S.	200	6,7	101	0,0754	2	5, 7, 8, 11, 12, 20	32	3	3	3	3	1
Joaquim Rodrigues	-44,643736	-16,217050	Luisiândia	Car.	C.	C.W.S.	125	23	61	0,0212	5	3, 7, 8, 12, 13, 20	29	3	3	3	3	N
Lapa Sem Fim	-44,627803	-16,148575	Luisiândia	Car.	C.	C.W.S.	2200	10	151	0,0069	7	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 20	47	4	4	4	4	1
Serra Grande	-44,820061	-21,559782	Luminárias	Sil.	M.A.	A.F.	213	15	88	0,0275	0	3	5	2	2	3	3	1

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	V. U. E.	C. P. A.
Escadas	-44,06821	-19,516497	Matozinhos	Car.	C.	C.W.S.	1828	15	59	0,0022	3	3, 4, 7, 8, 10, 12, 20	37	3	3	3	3	1
Cachoeira	-45,960415	-19,216306	Matutina	Car.	C.	A.F.	20	13,3	61	0,2293	0	3, 4, 7, 12, 13, 20	30	2	2	2	3	3
Campo de Futebol	-45,964787	-19,21725	Matutina	Car.	C.	A.F.	25	15	42	0,112	0	2, 3, 5, 7, 8, 12, 13, 20	41	2	2	2	3	3
Gruta 9	-45,959865	-19,216553	Matutina	Car.	C.	A.F.	8	1,6	48	3,8217	1	3, 4, 7, 12, 13, 20	30	3	3	3	4	3
Aguinhas	-42,389391	-17,425826	Minas Novas	Sil.	C.	C.W.S.	13	7	45	0,4945	0	2, 3, 4, 7, 8	26	2	3	2	2	N
Junia	-44,121981	-18,264047	Monjolos	Car.	C.	A.F.	320	8	26	0,0102	0	3, 7, 8, 9, 12, 20	28	2	2	2	2	1
Lapa do Marcelo	-44,102193	-18,276726	Monjolos	Car.	C.	A.F.	700	6	41	0,0098	4	3, 4, 5, 7, 8, 12, 20	35	3	3	3	4	1
Toca do Geraldo	-44,102996	-18,278727	Monjolos	Car.	C.	A.F.	1500	14	37	0,0018	0	2, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 20	43	2	2	2	3	1
Fósseis	-44,315476	-14,360413	Montalvânia	Car.	C.	A.D.F.	120	12	24	0,0375	0	3, 7, 8, 9, 10, 12	30	2	2	2	2	1
Gruta do veado	-44,392976	-14,286846	Montalvânia	Car.	C.	A.D.F.	25	4	57	0,5700	2	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12	35	3	3	3	4	1
Boqueirão da Nascente	-43,941677	-16,712649	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	620	15	70	0,0075	8	7, 11, 14, 17	24	3	3	3	3	1
Cedro	-44,104423	-16,931280	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	389	12	25	0,0054	4	5, 7, 8, 12, 13, 20	30	2	2	2	2	1
Claudina	-43,994084	-16,679251	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	550	18	81	0,0082	4	7, 8, 12, 13, 20	24	3	3	3	3	2
Cristais	-43,940288	-16,704291	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	200	4	43	0,0538	4	3, 7, 13	15	2	2	2	2	2
Encantada	-43,994569	-16,331289	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	2200	23	84	0,0017	4	4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 17, 20	50	4	4	4	4	2

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Lapa da Santa	-43,992281	-16,681556	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	800	7	57	0,0102	3	7, 8, 12, 13, 20	24	2	2	2	2
Lapa d'água MOC	-43,920924	-16,707038	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	1234	12	104	0,0070	10	7, 9, 12, 13, 20	24	4	4	4	4
Lapa Grande	-43,942910	-16,706672	Montes Claros	Car.	C.	C.W.S.	2100	23,5	57	0,0012	6	7, 10, 12, 13, 20	27	3	3	3	3
SPT_316	-43,390223	-19,221419	Morro do Pilar	Fer.	C.	C.W.S.	78,6	7	45	0,0818	4	3, 7	9	2	3	2	2
Jaime	-46,320528	-22,613998	Munhoz	Gra.	M.A.	A.F.	30	1	38	1,2667	1	7	4	2	3	3	2
Labirinto	-46,322103	-22,614420	Munhoz	Gra.	M.A.	A.F.	50	3	60	0,4000	5	7, 12	7	2	4	4	2
Zé Capucho	-41,222430	-17,316505	Novo O. de Minas	Gra.	M.A.	A.F.	150	13	49	0,0251	2	3, 7, 8, 11	22	2	4	4	3
Cerâmicas	-45,597544	-20,404295	Pains	Car.	C.	A.F.	80	28	75	0,0335	4	4, 7, 8, 13, 19	27	3	3	3	4
Borboleta Azul	-45,690270	-20,326751	Pains	Car.	C.	C.W.S.	60	13	31	0,0397	3	3, 7, 8	14	2	2	2	2
Capoeirão	-45,782537	-20,340395	Pains	Car.	C.	A.F.	170	25	37	0,0087	2	1, 7	13	2	2	2	2
Cavalinho	-45,796326	-20,301795	Pains	Car.	C.	A.F.	250	10	60	0,0240	5	7	4	2	2	2	3
Cinderela	-45,600381	-20,446149	Pains	Car.	C.	A.F.	98,9	1	40	0,4044	4	1, 3, 7, 12, 14, 20	33	3	3	3	4
Coelho	-45,684967	-20,414527	Pains	Car.	C.	C.W.S.	15	6,6	56	0,5657	1	7, 20	10	2	2	2	2
Cornélio III	-45,669725	-20,300708	Pains	Car.	C.	A.F.	37,8	6	44	0,1940	6	7	4	2	2	2	3
Cristais	-45,633244	-20,425268	Pains	Car.	C.	A.F.	50	10	56	0,1120	2	7, 8, 9, 13, 14, 17, 20	38	3	3	3	4
Duas Bocas	-45,678148	-20,367478	Pains	Car.	C.	A.F.	35	7	41	0,1673	3	1, 7	13	2	2	2	2
Fazenda Amargoso	-45,592622	-20,397860	Pains	Car.	C.	A.F.	200	9	67	0,0372	4	4, 7, 20	16	2	2	2	4
Físico	-45,669343	-20,401034	Pains	Car.	C.	A.F.	45	3	59	0,4370	2	7	4	2	2	2	3

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Isaias	-45,657309	-20,367874	Pains	Car.	C.	A.F.	200	12,9	61	0,0236	5	3, 7, 9, 12, 13, 20	29	3	3	3	4	1
L. dos Negros III	-45,659638	-20,435462	Pains	Car.	C.	C.W.S.	57	5,9	40	0,1189	3	7	4	2	2	2	2	1
Lanchonete da Coruja	-45,803121	-20,325049	Pains	Car.	C.	A.F.	110	18,4	69	0,0341	4	7, 8	9	2	2	2	4	1
Macacaos III	-45,671894	-20,407901	Pains	Car.	C.	C.W.S.	138	10,9	54	0,0361	1	7	4	2	2	2	2	1
Olhos D'Água	-45,684666	-20,311620	Pains	Car.	C.	A.F.	149	4,6	73	0,1060	5	4, 7, 12, 13, 20	25	3	3	3	4	1
Paranoá	-45,669016	-20,365064	Pains	Car.	C.	A.F.	249	21,9	88	0,0162	4	1, 2, 7, 9, 12, 13	33	3	3	3	4	1
Ponte Velha I	-45,690531	-20,415536	Pains	Car.	C.	C.W.S.	92	5,3	61	0,1251	4	7, 18, 20	15	2	2	2	2	1
Serra Azul	-45,646763	-20,375548	Pains	Car.	C.	A.F.	493	0,3	60	0,4057	7	4, 7	10	2	2	2	4	1
Tio Rafa I	-45,664690	-20,413178	Pains	Car.	C.	C.W.S.	76	7,6	56	0,0971	1	7	4	2	2	2	2	1
Tio Rafa II	-45,664690	-20,413178	Pains	Car.	C.	C.W.S.	179	18,8	73	0,0216	2	7	4	2	2	2	2	1
Zé Erpídio	-45,678617	-20,415483	Pains	Car.	C.	C.W.S.	32	4	53	0,4141	1	7	4	2	2	2	2	1
Zé Serafim	-45,656786	-20,413976	Pains	Car.	C.	C.W.S.	63	9,9	50	0,0802	3	3, 7, 12, 13, 20	24	2	2	2	2	1
Zizinho Beraldo	-45,834085	-20,356303	Pains	Car.	C.	C.W.S.	268	7	71	0,0378	6	7, 8, 9, 12, 13, 20	29	3	3	3	3	1
Brocotó	-46,805407	-17,324402	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	30	4,5	73	0,5407	0	3, 7, 8, 20	20	2	2	2	2	3
Brocotó II	-46,805102	-17,323005	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	60	5	73	0,2433	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	3
Cava	-46,903326	-16,883648	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	38	3,3	48	0,3828	1	3, 7, 8	14	2	2	2	2	4
Lagoa Rica	-46,793076	-17,151218	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	200	5	56	0,0560	7	1, 2, 3, 7, 9, 10, 12, 13, 20	52	4	4	4	4	4
Santo Antonio	-46,818493	-17,125511	Paracatu	Car.	C.	C.W.S.	67	13,75	51	0,0554	2	3	5	2	2	2	2	1

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Caverna do Diabo	-45,906500	-22,656800	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	41	6	45	0,1829	2	7, 20	10	2	3	3	1
Goulart	-45,779200	-22,593200	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	34	20	48	0,0706	0	3, 7, 12, 13, 20	24	2	3	3	1
Machadão	-45,812100	-22,571300	Paraisópolis	Gra.	M.A.	A.F.	50	3	57	0,3800	0	3, 7	9	2	3	2	1
Pacas P.L.	-43,967326	-19,561021	Pedro Leopoldo	Car.	C.	C.W.S.	319,6	9,4	34	0,0113	1	3, 7, 8, 12, 13	23	2	2	2	N
Marinheiros	-45,812731	-20,400425	Pimenta	Car.	C.	C.W.S.	200	18	89	0,0247	4	7, 12, 13, 14, 19, 20	31	3	3	3	3
Lapa d'água PJ	-44,128192	-18,563372	Pres. Juscelino	Car.	C.	C.W.S.	600	11	64	0,0097	8	3, 7, 8, 12	17	3	3	3	N
Cateira	-46,087531	-18,31695	Pres. Olegário	Car.	C.	C.W.S.	200	22	61	0,0139	2	2, 3, 7, 13	21	2	2	2	1
Juruva	-46,081183	-18,321658	Pres. Olegário	Car.	C.	C.W.S.	250	15	110	0,0293	1	2, 3, 7, 13	21	2	2	2	1
Tauá	-46,413427	-17,944806	Pres. Olegário	Car.	C.	C.W.S.	26	15,36	22	0,0551	0	3, 13	11	1	1	1	3
Vereda da Palha	-46,126011	-18,255221	Pres. Olegário	Car.	C.	C.W.S.	250	14	117	0,0334	3	2, 3, 7, 13	21	3	3	3	1
Boca Larga	-42,750284	-16,073615	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	13,20	8,80	24	0,2066	0	3	5	1	2	1	2
Chaminé	-42,721824	-16,085872	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	47,40	11,27	16	0,0300	0	7, 8	9	1	2	1	2
Gameleira	-42,721685	-16,085762	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	7,60	7,80	18	0,3036	0	3, 7	9	1	2	1	2
Lago	-42,722937	-16,082709	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	98	10	27	0,0276	4	3, 7, 8	14	2	3	2	2
Mandaçaia	-42,722554	-16,082519	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	44,45	14,11	36	0,0574	1	7, 8	9	1	2	1	2

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.	
Mercedes 1	-42,720667	-16,086510	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	16,54	9,40	13	0,0836	0	3, 7, 8	14	1	2	1	1	2
Mercedes 2	-42,720865	-16,087163	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	5	7,10	21	0,5915	0	3, 7, 8	14	1	2	1	1	2
Morro do Capim	-42,750604	-16,073429	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	9,40	7,85	24	0,3252	1	3	5	1	2	1	1	2
Morro Grande	-42,784466	-16,141209	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	94	3	40	0,1418	4	2, 3, 4, 7, 8	26	2	4	2	2	1
Paleotoca 1	-42,721555	-16,112692	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	24	3	27	0,3750	0	3	5	1	2	1	1	2
Paleotoca 2	-42,722139	-16,113086	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	17,13	12	11	0,0535	0	N	0	1	1	1	1	2
Paleotoca 3	-42,722016	-16,113284	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	22,46	3,75	10	0,1189	0	N	0	1	1	1	1	2
Paleotoca 4	-42,721475	-16,113179	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	9	5,71	22	0,4278	0	3	5	1	2	1	1	2
Paleotoca 5	-42,721258	-16,113357	Riacho dos Machados	Fer.	C.	C.W.S.	5	3	19	1,2667	0	3	5	2	2	2	2	2
Coruja branca	-42,692492	-16,084292	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	4	2,30	11	1,1957	0	3, 7	9	2	2	2	2	4
João de Rita 1	-42,714617	-16,046839	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	36	11,95	42	0,0976	1	N	0	2	2	2	2	1
João de Rita 2	-42,714769	-16,046597	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	9	10,60	32	0,3354	0	N	0	1	2	1	1	1
Maritacas	-42,693150	-16,083956	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	37,13	135	42	0,0867	2	7	4	2	2	2	2	4
Mocororô	-42,703600	-16,010200	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	84	4	28	0,0833	2	3, 7, 8, 12	17	2	3	2	2	1
Nilson	-42,709297	-16,020231	Rio Pardo de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	10,10	9,80	20	0,2021	0	3	5	1	1	1	1	1

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
AVG-05	-43,694590	-19,822884	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	77,2	10,56	48	0,0589	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-08	-43,705539	-19,823081	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	76,6	12,3	45	0,0478	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-27	-43,696550	-19,822455	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	22,2	1,3	29	1,0049	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-30	-43,696867	-19,822304	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	74,1	5,2	71	0,1843	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-38	-43,695194	-19,822472	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	16,5	4,1	47	0,6948	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-41	-43,695426	-19,822194	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	26,2	6,1	41	0,2565	3	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-47	-43,695782	-19,822965	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	32,5	1,2	39	1,0000	4	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-48	-43,695707	-19,822865	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	15,3	1,3	27	1,3575	2	1, 2, 3, 4, 7	30	3	4	3	3	1
AVG-50	-43,698522	-19,820690	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	62,3	8,2	36	0,0705	2	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-51	-43,698123	-19,820407	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	25,9	7,3	21	0,1111	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-64	-43,698462	-19,821060	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	28,1	9,5	20	0,0749	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
AVG-75	-43,687935	-19,821696	Sabará	Fer.	C.	C.W.S.	35,6	5,3	33	0,1749	1	1, 2, 3, 4, 7	30	2	3	2	2	1
Gand_0073	-43,658474	-20,040057	Santa Bárbara	Fer.	M.A.	A.F.	350	1,8	86	0,1365	4	3	5	2	3	4	4	1
Gand_0114	-43,670630	-20,068469	Santa Bárbara	Fer.	M.A.	A.F.	270	6,3	37	0,0218	4	3	5	2	3	3	3	1
Viola	-43,616758	-19,295742	Santana do Riacho	Car.	C.	C.W.S.	604	8	43	0,0089	3	3, 7, 12, 20	18	2	2	2	2	1
Mãe de Ná	-44,001946	-15,806895	São João da Ponte	Car.	C.	A.D.F.	150	3	29	0,0644	1	3, 7, 8, 9, 10, 20	33	2	2	2	2	N
Boa Vista	-42,49997	-17,961298	São S. do Maranhao	Sil.	M.A.	A.F.	28	9	46	0,1825	0	3, 7, 8, 20	20	2	2	3	3	N
Córrego das Canoas	-42,744876	-16,016154	Serranópolis de Minas	Fer.	C.	C.W.S.	28	6	23	0,1369	0	3	5	1	2	1	1	2

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W,	V. U. G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Fugitivos	-43,883096	-21,677731	Sta. Rita do Ibitipoca	Sil.	M.A.	A.F.	440	40	52	0,0030	0	3, 13	11	2	2	2	2	1
Captação	-42,787133	-17,275379	Turmalina	Sil.	C.	C.W.S.	17	6	25	0,2451	1	3, 7, 8, 12, 20	23	2	2	2	2	1
Barth Caverna	-47,067706	-16,416107	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	160	14	46	0,0205	2	2, 3, 7, 8, 9	25	2	2	2	2	2
Deus Me Livre	-47,060501	-16,425303	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	50	9	108	0,24	0	3, 7, 13	15	2	2	2	2	4
Frangas	-47,067519	-16,420563	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	13	3	40	1,0256	0	3	5	2	2	2	2	2
Mata dos Paulista	-47,069803	-16,4197	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	30	2	63	1,4	0	3, 7	9	2	2	2	2	3
Nilsinho	-44,706553	-16,214083	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	60	2	93	0,775	0	2, 3, 4, 7, 8, 20	32	3	3	3	3	N
Sapezal	-46,896032	-16,800507	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	130	15	70	0,0359	1	3, 12, 13, 20	20	2	2	2	2	1
Zezinho de Dionila	-44,707148	-16,215654	Ubaí	Car.	C.	C.W.S.	20	1	33	1,65	0	2, 3, 4, 7, 8, 20	32	2	2	2	2	N
Gameleira	-43,977195	-15,623442	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	250	2	32	0,064	1	7, 8, 10, 12, 15,	31	2	2	2	2	3
Indio	-43,9656	-15,6228	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	600	2	27	0,0225	1	5, 7, 10, 13, 20	30	2	2	2	2	3
Madeira	-43,965252	-15,62166	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	400	20	12	0,0015	0	5, 7, 8, 10, 13, 20	35	2	2	2	2	3
Morrinho	-43,973832	-15,622715	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	350	9,5	36	0,0108	5	3, 7, 9, 12, 20	23	2	2	2	3	3
Porteira	-43,976243	-15,623438	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	150	4	28	0,0467	1	7, 8, 10, 12, 20	26	2	2	2	2	3
Zé Avelino I	-44,054907	-15,607221	Varzelândia	Car.	C.	A.D.F.	2.100	23	114	0,0024	5	2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 20	55	4	4	4	4	3
Abrigo da Escarpa	-46,813028	-17,927781	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	4	10	39	0,975	0	2, 3, 7, 8, 10	28	2	2	2	3	4

Cave	Long.	Lat.	Municipality	Lit.	Bio.	Ecor.	L. D. S.	E. E.	R.	R.R.	T. R.	Impacts	I. W, G.	V. U. L.	V. U. B.	V. U. E.	C. P. A.
Delza	-46,906305	-17,984909	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	1400	4	48	0,0086	7	3, 7, 12, 13, 20	24	3	3	3	1
Escarpa	-46,813523	-17,927243	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	63,3	3	66	0,3476	0	2, 3, 7, 8, 10, 12	31	2	2	2	4
Guardião Severino	-46,88847	-17,988327	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	50	15	48	0,064	0	2, 3, 2007	15	2	2	2	1
Lapa Nova	-46,891002	-17,983206	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	4000	45	148	0,0008	7	2, 3, 7, 9, 12, 13, 14, 20	41	4	4	4	1
Lapa Nova II	-46,891707	-17,983805	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	600	4,5	55	0,0204	4	2, 3, 7, 13	21	2	2	2	1
Mata Velha	-46,892714	-18,012688	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	160	7	60	0,0536	0	7, 13, 20	16	2	2	2	1
Não Cadastrada	-46,810461	-17,922266	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	18,4	2	49	1,3315	2	3, 7, 8, 15, 20	25	3	3	3	4
Urtigas	-46,810804	-17,920682	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	368,5	30	75	0,0068	3	2, 3, 7, 8, 20	26	3	3	3	1
V01	-46,8249	-17,925809	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	5	2	15	1,5000	0	3, 7, 13	15	2	2	2	3
Vaca Morta	-46,827359	-17,928171	Vazante	Car.	C.	C.W.S.	16,1	7	73	0,6477	0	2, 3, 7, 8	20	2	2	2	3

Apêndice 2

Valores de referência utilizados para definir as categorias para a aplicação do “Cave Vulnerability index – modificado”. Tabela informando os intervalos (Intervalo) utilizados para atribuir pesos (p) às categorias de riqueza total, riqueza relativa, relevância biológica, espécies troglóbias, grau de impacto e grau de vulnerabilidade. A tabela apresenta divisões indicando os valores correspondentes à aplicação do CVI-m considerando todas as cavernas (Geral), cada uma das litologias (Litologia), cada um dos biomas (Bioma) e cada uma das ecorregiões (Ecorregiões).

		Riqueza total		Riqueza relativa		Relevância biológica		Espécies troglóbias		Grau de impacto		Grau de vulnerabilidade		
Categoria		Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	Cavernas	
Geral	Todas as cavernas	Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	44-58	4	9 11	10
	High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	29-43	3	7 8	49	
	Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-29	2	4 6	148	
	Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	42	
Litologia	Carbonática	Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9 11	11
	High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7 8	38	
	Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4 6	97	
	Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	7	
Litologia	Siliciolástica	Estreme	67-88	8	0.83-1.12	4	8-10	4	3-4	4	44-58	4	9 11	3
	High	45-66	6	0.56-0.82	3	6-7	3	2	3	29-43	3	7 8	4	
	Medium	23-44	4	0.28-0.55	2	4-5	2	1	2	15-29	2	4 6	36	
	Low	0-22	2	0-0.27	1	3	1	0	1	0-14	1	3	7	
Litologia	Ferruginosa	Estreme	65-86	8	2.39-3.17	4	8-9	4	3-4	4	23-30	4	10 12	9
	High	44-64	6	1.59-2.38	3	6-7	3	2	3	16-22	3	7 9	13	
	Medium	22-43	4	0.8-1.58	2	4-5	2	1	2	8-15	2	4 6	16	
	Low	0-21	2	0-0.79	1	3	1	0	1	0-7	1	3	3	
Litologia	Granitóide	Estreme	57-74	8	1.22-1.62	4	8-10	4	4-5	4	31-41	4	8 10	5
	High	38-56	6	0.81-1.21	3	6-7	3	2-3	3	21-30	3	6 7	10	
	Medium	19-37	4	0.41-0.80	2	4-5	2	1	2	11-20	2	4 5	4	
	Low	0-18	2	0-0.40	1	3	1	0	1	0-10	1	3	0	

		Riqueza total		Riqueza relativa		Relevância biológica		Espécies troglóbias		Grau de impacto		Grau de vulnerabilidade		
Categoria		Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	p	Intervalo	Cavernas	
Bioma	Cerrado	Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	44-58	4	9-11	10
		High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	29-43	3	7-8	48
		Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-29	2	4-6	117
		Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	21
	Atlantic Forest	Estreme	67-88	8	1.22-1.61	4	8-10	4	4-5	4	44-58	4	8-9	7
		High	45-66	6	0.81-1.21	3	6-7	3	2-3	3	29-43	3	6-7	17
		Medium	23-44	4	0.41-0.80	2	4-5	2	1	2	15-29	2	4-5	22
		Low	0-22	2	0-0.40	1	3	1	0	1	0-14	1	3	7
Ecorregião	Atlantic Dry Forests	Estreme	86-114	8	0.44-0.57	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9-11	6
		High	58-85	6	0.29-0.43	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7-8	2
		Medium	29-57	4	0.15-0.28	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4-6	8
		Low	0-28	2	0-0.14	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	0
	Atlantic Forests	Estreme	67-88	8	3.27-4.35	4	8-10	4	6-7	4	44-58	4	8-10	17
		High	45-66	6	2.18-3.26	3	6-7	3	4-5	3	29-43	3	6-7	27
		Medium	23-44	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-3	2	15-29	2	4-5	31
		Low	0-22	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	6
	Cerrado Woodlands and Savannas	Estreme	114-151	8	2.39-3.17	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9-11	8
		High	75-113	6	1.59-2.38	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7-8	36
		Medium	38-74	4	0.8-1.58	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4-6	84
		Low	0-37	2	0-0.79	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	24

Appendix 2

Reference values used to define the categories for the application of the "Cave Vulnerability index - modified". Table showing the intervals (Interval) used to assign weights (w) to the categories of total richness, relative richness, biological relevance, troglobitic species, impact degree and vulnerability degree. The table shows divisions indicating the values corresponding to the application of CVi-m considering all the caves (General), each of the lithologies (Lithology), each of the biomes (Biome) and each of the ecoregions (Ecoregions).

		Total richness		Relative richness		Biological relevance		Troglobitic species		Impact degree		Vulnerability degree		
General	All caves	Category	Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	Caves
		Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	44-58	4	9	11
High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	29-43	3	7	8	49	
Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-29	2	4	6	148	
Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3		42	
Lithology	Carbonatic	Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9	11
		High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7	8
		Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4	6
		Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	7
Lithology	Siliciclastic	Estreme	67-88	8	0.83-1.12	4	8-10	4	3-4	4	44-58	4	9	11
		High	45-66	6	0.56-0.82	3	6-7	3	2	3	29-43	3	7	8
		Medium	23-44	4	0.28-0.55	2	4-5	2	1	2	15-29	2	4	6
		Low	0-22	2	0-0.27	1	3	1	0	1	0-14	1	3	7
Lithology	Ferruginous	Estreme	65-86	8	2.39-3.17	4	8-9	4	3-4	4	23-30	4	10	12
		High	44-64	6	1.59-2.38	3	6-7	3	2	3	16-22	3	7	9
		Medium	22-43	4	0.8-1.58	2	4-5	2	1	2	8-15	2	4	6
		Low	0-21	2	0-0.79	1	3	1	0	1	0-7	1	3	3
Lithology	Granitoid	Estreme	57-74	8	1.22-1.62	4	8-10	4	4-5	4	31-41	4	8	10
		High	38-56	6	0.81-1.21	3	6-7	3	2-3	3	21-30	3	6	7
		Medium	19-37	4	0.41-0.80	2	4-5	2	1	2	11-20	2	4	5
		Low	0-18	2	0-0.40	1	3	1	0	1	0-10	1	3	0

		Total richness		Relative richness		Biological relevance		Troglobitic species		Impact degree		Vulnerability degree		
Category		Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	w	Interval	Caves	
Biome	Cerrado	Estreme	114-151	8	3.27-4.35	4	8-9	4	8-10	4	44-58	4	9-11	10
		High	75-113	6	2.18-3.26	3	6-7	3	5-7	3	29-43	3	7-8	48
		Medium	38-74	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-4	2	15-29	2	4-6	117
		Low	0-37	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	21
	Atlantic Forest	Estreme	67-88	8	1.22-1.61	4	8-10	4	4-5	4	44-58	4	8-9	7
		High	45-66	6	0.81-1.21	3	6-7	3	2-3	3	29-43	3	6-7	17
		Medium	23-44	4	0.41-0.80	2	4-5	2	1	2	15-29	2	4-5	22
		Low	0-22	2	0-0.40	1	3	1	0	1	0-14	1	3	7
Ecoregion	Atlantic Dry Forests	Estreme	86-114	8	0.44-0.57	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9-11	6
		High	58-85	6	0.29-0.43	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7-8	2
		Medium	29-57	4	0.15-0.28	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4-6	8
		Low	0-28	2	0-0.14	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	0
	Atlantic Forests	Estreme	67-88	8	3.27-4.35	4	8-10	4	6-7	4	44-58	4	8-10	17
		High	45-66	6	2.18-3.26	3	6-7	3	4-5	3	29-43	3	6-7	27
		Medium	23-44	4	1.09-2.17	2	4-5	2	2-3	2	15-29	2	4-5	31
		Low	0-22	2	0-1.08	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	6
Cerrado Woodlands and Savannas	Estreme	114-151	8	2.39-3.17	4	8-9	4	8-10	4	42-55	4	9-11	8	
	High	75-113	6	1.59-2.38	3	6-7	3	5-7	3	28-41	3	7-8	36	
	Medium	38-74	4	0.8-1.58	2	4-5	2	2-4	2	15-27	2	4-6	84	
	Low	0-37	2	0-0.79	1	3	1	0-1	1	0-14	1	3	24	

Apêndice 3

Avaliação de impactos de acordo com o estabelecido nas diretrizes metodológicas do CVI-m. Tabela demonstrando os impactos observados nas cavernas estudadas (Impactos observados); o número de cavernas afetadas por cada um deles (Cavernas afetadas); o código de referência pelo qual serão chamados ao longo do trabalho (I (ref)); os efeitos considerados para cada impacto podendo ser: depleção (D), enriquecimento (E) e alteração (A); o potencial de impacto (Pot) e seu respectivo peso (p) podendo ser: intenso (I (p 2)) ou tênue (T (p 1)); a permanência estimada do impacto (Perm) e seu respectivo peso (p) podendo ser: contínua (C (p 3)), ou de curta duração (S (p 1)); o alcance do impacto (Rng) e seu respectivo peso (p) podendo ser: pontual (P (p 1)) ou geral (G (p 2)); e, por fim, o peso final atribuído a cada um dos impactos que será utilizado para calcular o grau de impacto das cavernas no CVI-m.

Impactos Observados	Cavernas afetadas	I (ref)	Ef	Pot	p	Perm	p	Rng	p	Peso final
Em área de mineração	25	1	D+A	I	2+2	C	3	G	2	9
Solo exposto	47	2	A	I	2	C	3	P	1	6
Vias de acesso	161	3	A	T	1	C	3	P	1	5
Processo erosivo	44	4	A	I	2	C	3	P	1	6
Assoreamento de cavernas	27	5	A	I	2	C	3	P	1	6
Queimada	1	6	A	I	2	S	1	P	1	4
Desmatamento	212	7	D	T	1	S	1	G	2	4
Atividades agropastoris	101	8	A	T	1	C	3	P	1	5
Depredação de espeleotemas	19	9	A	T	1	S	1	P	1	5
Resquícios de mineração antiga	18	10	D+A	I	2+2	C	3	P	1	8
Assoreamento de drenagem	15	11	D+A	I	2+2	C	3	P	1	8
Pichação	75	12	A	T	1	S	1	P	1	3
Compactação de solo	66	13	D	I	2	C	3	P	1	6
Construção de alvenaria	15	14	A	I	2	C	3	P	1	6
Fogueiras	4	15	D+A	I	2	S	1	G	2	5
Iluminação artificial	1	16	A+E	I	2+2	C	3	P	1	8
Captação de água	9	17	D	I	2	C	3	P	1	6
Controle de pragas	2	18	D	I	2	S	1	G	2	5
Poluição de curso d'água	3	19	A	I	2	C	3	P	1	6
Lixo	85	20	A	I	2	C	3	P	1	6

Appendix 3

Impacts assessment in accordance with the CVi-m methodological guidelines. Table showing the impacts observed in the studied caves (Observed impacts); the number of caves affected by each of them (Affected caves); the reference code by which they will be called throughout the work (I (ref)); the effects considered for each impact, which can be: depletion (D), enrichment (E) and alteration (A); the potential of the impact (Pot) and its respective weight (w) which can be: intense (I (p 2)) or tenuous (T (p 1)); the estimated permanence of the impact (Perm) and its respective weight (w) which can be: continuous (C (p 3)), or short-lived (S (p 1)); the scope of the impact (Rng) and its respective weight (w) which can be: punctual (P (p 1)) or general (G (p 2)); and finally, the final weight assigned to each of the impacts that will be used to calculate the degree of impact of the caves on the CVi-m.

Observed Impacts	Affected caves	"I (ref)"	Ef	Pot	w	Perm	w	Rng	w	Final weight
Inside a mining area	25	1	D+A	I	2+2	C	3	G	2	9
Bare soil	47	2	A	I	2	C	3	P	1	6
Access roads	161	3	A	T	1	C	3	P	1	5
Erosion	44	4	A	I	2	C	3	P	1	6
Cave siltation	27	5	A	I	2	C	3	P	1	6
Wildfire	1	6	A	I	2	S	1	P	1	4
Deforestation	212	7	D	T	1	S	1	G	2	4
Agropastoral activities	101	8	A	T	1	C	3	P	1	5
Depredation of speleothems	19	9	A	T	1	S	1	P	1	5
Remnants of old mining	18	10	D+A	I	2+2	C	3	P	1	8
Drainage siltation	15	11	D+A	I	2+2	C	3	P	1	8
Graffiti	75	12	A	T	1	S	1	P	1	3
Soil compaction	66	13	D	I	2	C	3	P	1	6
Masonry construction	15	14	A	I	2	C	3	P	1	6
Bonfire	4	15	D+A	I	2	S	1	G	2	5
Artificial lighting	1	16	A+E	I	2+2	C	3	P	1	8
Water collection	9	17	D	I	2	C	3	P	1	6
Pest control	2	18	D	I	2	S	1	G	2	5
Watercourse pollution	3	19	A	I	2	C	3	P	1	6
Littering	85	20	A	I	2	C	3	P	1	6

PROTEÇÃO FORNECIDA POR PEQUENA CAVERNA PARA UMA COLÔNIA DE MORCEGOS (*Anoura geoffroyi* GRAY, 1838) DURANTE INCÊNDIO FLORESTAL OCORRIDO NO BRASIL

PROTECTION PROVIDED BY A SMALL CAVE FOR A BAT COLONY (*Anoura geoffroyi* GRAY, 1838) DURING A FOREST FIRE IN BRAZIL

Aline da Silva Reis

Observatório Espeleológico – OE
E-mail: alineambiental@yahoo.com.br

Robson de Almeida Zampaulo

Observatório Espeleológico – OE
E-mail: rzampaulo@yahoo.com.br

RESUMO

Morcegos são considerados de extrema importância para o ambiente cavernícola atuando diretamente no aporte energético destes ecossistemas. O guano produzido por alguns grupos de morcegos possui extremo valor energético chegando ao ponto de algumas espécies de invertebrados (guanóbios) terem se especializado a viver exclusivamente deste recurso. Em contrapartida, para os morcegos, as cavernas fornecem abrigo e proteção contra intempéries e predadores. Neste trabalho, avaliamos variações no microclima da caverna MJ_0005 durante um evento de incêndio ocorrido em seu entorno. Para esta avaliação, utilizamos os dados de três *data loggers* sendo um instalado próximo a entrada da caverna no ambiente externo, um no meio da caverna e um próximo

ABSTRACT

*Bats are considered to be extremely important for the cave environment, acting directly in these ecosystems' energy supply. The guano produced by some bat groups has extreme energetic value, to the point where some invertebrates species (detritivores) have specialized in living exclusively off this resource. On the other hand, caves provide shelter and protection from weather and predators for bats. In this study, we evaluated variations in the MJ_0005 cave's microclimate during a fire event in its surroundings. Data from three data loggers were used for this evaluation. One installed near the outside of the cave's entrance, one in the middle of the cave and one near a large *Anoura geoffroyi* bat colony. The outside's average temperature ($x 22,6^{\circ}\text{C}$) was significantly higher than the average temperatures in the middle of the cave ($x 18,3^{\circ}\text{C}$) and at*

ao local onde uma grande colônia de morcegos da espécie *Anoura geoffroyi* reside. No dia do incêndio, a temperatura média do ambiente externo (x 22,6°C) apresentou-se expressivamente maior que as temperaturas médias do meio da caverna (x 18,3°C) e do local da colônia (x 18,6°C). No momento em que o incêndio se aproximou da área onde se encontrava o *logger* externo, a temperatura atingiu 33,3°C, enquanto a temperatura registrada no meio da caverna era de 16,4°C e no ponto próximo a colônia a temperatura era 17,0°C. Mesmo no momento em que o *logger* externo apresentou o maior valor de temperatura (46,0°C), os dados observados no ponto da colônia e no centro da caverna foram inferiores as médias anuais observadas neste ambiente. Desta forma, torna-se evidente que mesmo cavernas de pequenas dimensões também podem representar refúgios importantes para a fauna em locais onde a incidência de distúrbios ambientais como os incêndios florestais ocorrem de maneira constante, sendo, portanto, um aspecto importante a ser avaliado em estudos de relevância espeleológica em regiões onde a disponibilidade de cavernas é restrita.

PALAVRAS-CHAVE: Fogo, abrigo, impacto, fauna.

INTRODUÇÃO

A ordem Chiroptera é considerada a segunda maior ordem de mamíferos em número de espécies conhecidas no mundo. Atualmente, no Brasil são encontradas 182 espécies de morcegos, distribuídas em 68 gêneros e nove famílias (GARBINO *et al.*, 2020).

Os morcegos são extremamente importantes no equilíbrio ecológico dos ecossistemas, desempenhando serviços fundamentais, como

the colony site (x 18,6°C) on the day of the fire. The temperature reached 33,3°C when the fire approached the external logger's location. Meanwhile the temperature recorded in the middle of the cave was 16,4°C whilst at the colony's location was 17,0°C. The data observed at the colony point as well as in the center of the cave were lower than the annual averages observed in this environment even when the external logger showed the highest temperature (46,0°C). Thus, it becomes clear that even small caves can also represent important refuges for fauna in places where environmental disturbances such as forest fires constantly occurs. Therefore, they are an important aspect to be evaluated in speleological relevant studies in regions where their availability is restricted.

KEYWORDS: Fire, shelter, impact, fauna.

INTRODUCTION

*The Chiroptera order is considered to be the second largest mammals order in terms of the number of known species in the world. Currently, 182 bat species are found in Brazil. They are distributed in 68 genera and nine families (GARBINO *et al.*, 2020).*

Bats are extremely important in the ecological balance of ecosystems, performing fundamental services such as pollinating plants, dispersing

a polinização de plantas, dispersão de sementes e o controle de populações de insetos (KUNZ; LUMSDEN, 2003; PIMENTEL *et al.*, 2022).

O grupo também é considerado de extrema importância para os ambientes cavernícolas, onde atuam diretamente no aporte energético para o interior da caverna. O guano produzido por alguns grupos de morcegos é de extrema importância, especialmente em cavernas permanentemente secas. Além disso, algumas espécies de invertebrados (guanóbios) podem ser consideradas como especialistas neste tipo de recurso, alimentando exclusivamente dos dejetos produzidos pelas colônias de morcegos (BAHIA; FERREIRA, 2005; FERREIRA *et al.*, 2000; GNASPINI; TRAJANO, 2000).

Em contrapartida, para os morcegos, as cavernas fornecem abrigo e proteção contra intempéries e predadores. Segundo Pereira e colaboradores (2022), no Brasil aproximadamente 45% (80) das espécies de morcegos conhecidas já foram registradas em cavernas, sendo estas utilizadas de forma permanente ou temporária como abrigos diurnos ou poleiros noturnos. A seleção de abrigos por morcegos ainda não é muito clara, no entanto acredita-se que a escolha leve em consideração a interação de diversos fatores, incluindo aspectos físicos (temperatura, umidade, fluxo de ar e intensidade da luz), fatores bióticos (distribuição e abundância de alimento, riscos de predação, competição), além de fatores ecológicos da espécie (KUNZ, 1982; TORQUETTI; SILVA; TALAMONI, 2017; TRAJANO, 1985).

São poucos os estudos realizados no Brasil que tenham como objetivo compreender como os morcegos respondem aos incêndios florestais, sendo inexistente qualquer estudo que avalie

*seeds and controlling insect populations (KUNZ; LUMSDEN, 2003; PIMENTEL *et al.*, 2022).*

*The group is also considered to be extremely important for cave environments. It directly supplies energy to the cave's interior. The guano produced by some bat groups is extremely important, especially in permanently dry caves. In addition, some invertebrate species (detritivores) can be considered specialists in this type of resource, feeding exclusively on the waste produced by bat colonies (BAHIA; FERREIRA, 2005; FERREIRA *et al.*, 2000; GNASPINI; TRAJANO, 2000).*

*On the other hand, caves provide shelter and protection from weather and predators for bats. According to Pereira *et al.* (2022), approximately 45% (80) of known bat species have been recorded in Brazil's caves. They are either permanently or temporarily used as daytime shelters or nighttime roosts. The bats' shelter selection is still unclear, but it is believed that the choice takes the interaction of various factors into account. These factors include physical aspects (temperature, humidity, air flow and light intensity), biotic factors (food distribution and abundance, predation risks, competition), as well as the species ecological factors (KUNZ, 1982; TORQUETTI; SILVA; TALAMONI, 2017; TRAJANO, 1985).*

*Few studies have been carried out in Brazil to understand how bats respond to forest fires, and there are no studies evaluating the shelter's importance as a protection strategy against those fires (OLIVEIRA; AGUIAR, 2015; SANTOS *et al.* 2021; LOEB; BLAKEY, 2021).*

Therefore, this study aims to show how a small ferruginous underground natural cave microclimate behaves when a large forest fire occurs in its surroundings. Thereby, it was assessed how

a importância do abrigo como estratégia de proteção contra incêndios florestais (OLIVEIRA; AGUIAR, 2015; SANTOS *et al.* 2021; LOEB; BLAKEY, 2021).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo demonstrar como se comporta o microclima de uma pequena cavidade natural subterrânea ferruginosa diante da ocorrência de um grande evento de incêndio florestal em seu entorno. Desta forma, avaliamos como estes ambientes podem representar uma importante forma de proteção para fauna cavernícola, em especial para uma grande colônia de morcegos.

METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado em uma pequena caverna localizada no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais (Figura 1). Esta caverna corresponde a um importante abrigo reprodutivo utilizado por uma grande população de morcegos da espécie *Anoura geoffroyi* (REIS *et al.*, 2022). O Quadrilátero Ferrífero (QF) apresenta litologia propensa para o desenvolvimento de cavernas, geralmente de pequenas dimensões. De acordo com Auler e Piló (2007), em torno de 70% das cavidades no QF apresentam dimensões que estão no intervalo entre 20-30 metros de projeção horizontal.

A caverna MJ_0005 (WGS 84 - 23K 596494E / 7777744N - 1.072 altitude) encontra-se localizada no município de Brumadinho, área metropolitana de Belo Horizonte (Figura 1). Em relação a sua morfologia, ela possui aproximadamente 36 metros de projeção horizontal (PH) e um pequeno curso d'água perene que percorre toda sua extensão. Desenvolvida na formação ferrífera, a caverna apresenta tendência retilínea

these environments can represent an important form of protection for cave fauna, especially for large bat colonies.

METHODOLOGY

*This study was carried out in a small cave located in the Iron Quadrangle, Minas Gerais state (Figure 1). This cave corresponds to an important breeding shelter used by a large *Anoura geoffroyi* bat population (REIS *et al.*, 2022). The Iron Quadrangle's lithology is prone to caves development, which are generally small in size. According to Auler and Piló (2007), around 70% of the Iron Quadrangle's caves are between 20-30 meters in horizontal projection.*

Cave MJ_0005 (WGS 84 - 23K 596494E / 7777744N - 1,072 altitude) is located in the Brumadinho municipality, in Belo Horizonte metropolitan area (Figure 1). In terms of its morphology, it has approximately 36 meters of horizontal projection (HP) and a small perennial watercourse that runs along its entire length. Developed in the ferriferous formation, the cave has a rectilinear trend and is formed by a single simple conduit with some lateral recesses and two entrances. The upstream entrance is approximately 1.30 meters high and 6 meters wide, while the downstream entrance is about 50 cm high and 3 meters wide (Figure 1).

sendo formada por conduto único e simples, com algumas reentrâncias laterais, e duas entradas. A entrada a montante possui aproximadamente 1,30 metros de altura por 6 metros de largura já a entrada a jusante apresenta cerca de 50 cm de altura por 3 metros de largura (Figura 1).

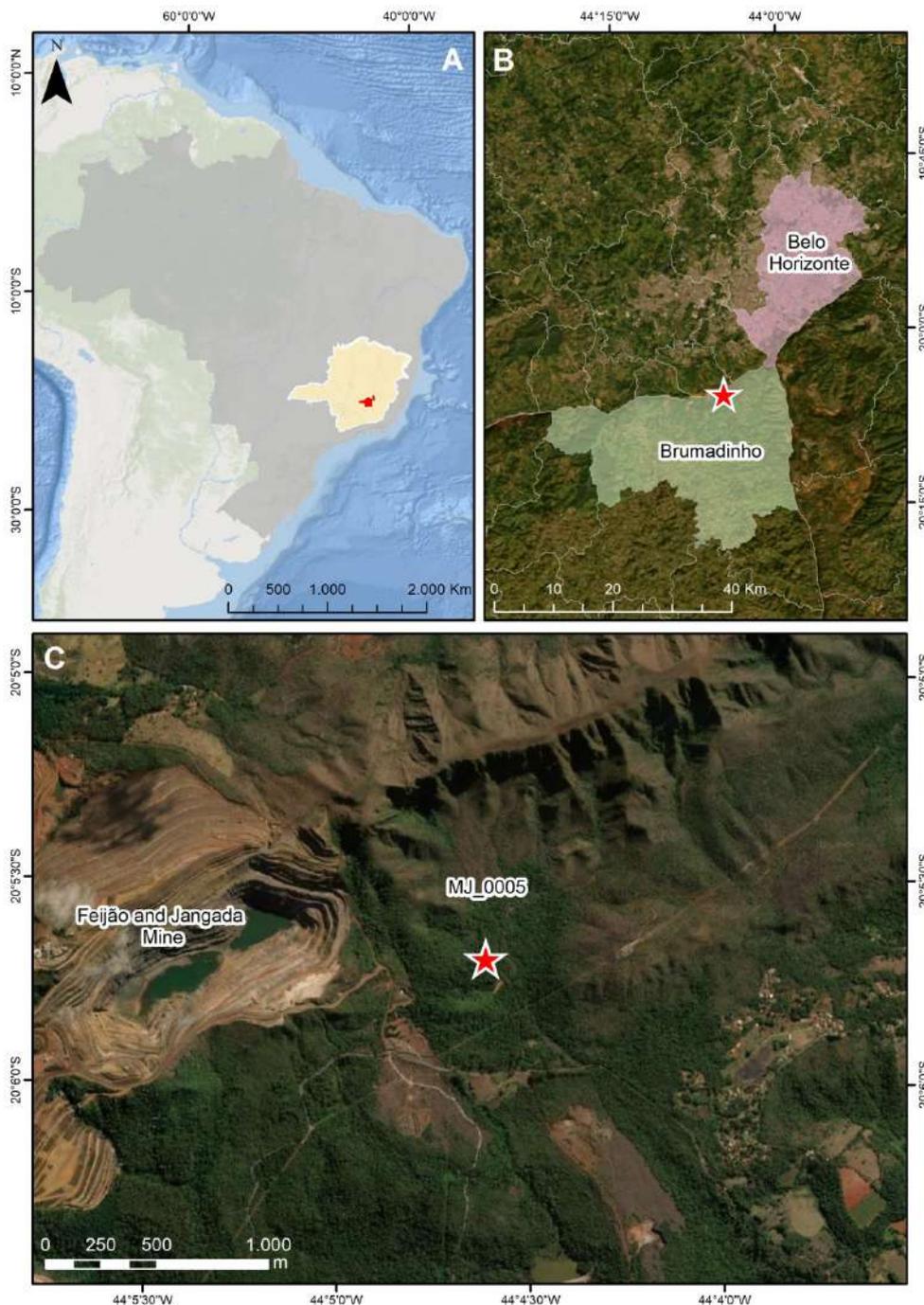


Figura 1 – Mapa com a localização da caverna MJ_0005 em relação ao Quadrilátero Ferrífero e a área metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Figure 1 – Map showing the MJ_0005 cave location in relation to the Iron Quadrangle and the metropolitan area of Belo Horizonte, Minas Gerais.

Coleta de dados

Para a aferição dos dados de temperatura e umidade foram utilizados dois data loggers previamente instalados no interior da caverna para fins de monitoramento, sendo um próximo à colônia de morcegos (L1) e outro na porção mediana da caverna (L2). Para comparar as condições ambientais do interior da caverna com o ambiente epígeo, um terceiro data logger foi instalado no ambiente externo próximo à entrada a jusante (L3) (Figura 2). Os loggers utilizados da marca HOBO, modelo U23-001 (Temperatura, precisão: +/- 0,21°C de 0° a 50°C; Umidade, precisão: +/- 2,5%), foram programados para a coleta de dados de temperatura e umidade em intervalos de 30 minutos, sendo as medições realizadas entre março de 2017 e março de 2018.

Data collection

Two data loggers were previously installed inside the cave to measure temperature and humidity data, for monitoring purposes. One of them was installed near the bat colony (L1) and the other in the middle of the cave (L2). A third data logger was installed in the external environment near the downstream entrance (L3) (Figure 2) to compare the environmental conditions inside the cave with the epigeal environment. The HOBO data loggers used, model U23-001 (Temperature, accuracy: +/- 0.21°C from 0° to 50°C; Humidity, accuracy: +/- 2.5%), were programmed to collect temperature and humidity data at 30-minute intervals, and measurements were taken between March 2017 and March 2018.

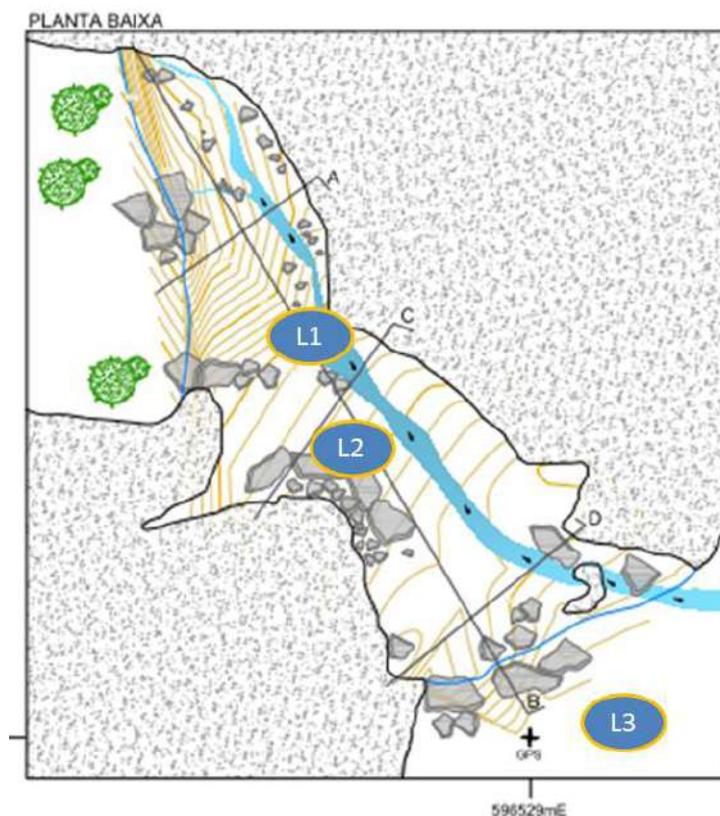


Figura 2 – Planta baixa da caverna indicando a localização de instalação dos data loggers (LN) utilizados no experimento. Fonte: Mapa topográfico elaborado pela VALE S.A. e adaptado pelos autores.

Figure 2 – Cave's floor plan showing the location of the data loggers (LN) used in the experiment. Source: Topographic map prepared by VALE S.A. and adapted by the authors.

Análises dos dados

Para avaliar as condições climáticas dos pontos de amostragem ao longo do ano, os dados de temperatura e umidade no interior da caverna foram comparados entre si e com dados obtidos no ambiente epígeo. Estas variáveis foram comparadas por meio do teste de Wilcoxon (não paramétrico) sendo as análises realizadas nos programas R Project 3.5.1 (2018) considerando nível de significância de 5%.

Para avaliar as condições ambientais do abrigo e como os fatores climáticos no interior da caverna se comportaram no dia do incêndio, médias anuais obtidas nos pontos de amostragem no interior da caverna foram comparados com os dados obtidos no dia do incêndio. Além disso, estas variáveis obtidas no interior da caverna e no ambiente epígeo foram comparadas entre si no momento do ápice do incêndio e ao longo do dia.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Caracterização do microclima anual da caverna

A temperatura média anual da caverna MJ_0005 foi de 18,3°C, sendo as menores temperaturas observadas em julho com 11°C e as maiores temperaturas registradas em dezembro, chegando a 25,3°C. A umidade média anual da caverna MJ_0005 foi de 89% (Tabela 1). O mês de setembro apresentou as menores taxas de umidade, chegando a 37%, tendendo a saturação nos meses da estação úmida (dezembro a março).

Data analysis

The temperature and humidity data inside the cave were compared with each other and with data obtained in the epigeal environment to assess the climatic sampling points conditions throughout the year. These variables were compared using the Wilcoxon test (non-parametric) and the analyses were carried out in the R Project 3.5.1 (2018) program, considering a significance level of 5%.

Annual averages obtained at the sampling points inside the cave were compared with the data obtained on the day of the fire to assess the environmental conditions of the shelter and how the climatic factors inside the cave behaved on that day. In addition, these variables obtained inside the cave and in the epigeal environment were compared with each other at the fire's apex and throughout the day.

RESULTS AND DISCUSSION

Cave's annual microclimate characterization

The average annual temperature in MJ_0005 cave was 18.3°C, with the lowest temperatures observed in July at 11°C and the highest temperatures recorded in December, reaching 25.3°C. The average annual humidity in cave MJ_0005 was 89% (Table 1). The month of September showed the lowest humidity rates, reaching 37%, tending towards saturation in the wet season months (December to March).

Tabela 1 - Dados das médias anuais de temperatura e umidade de cada ponto amostral (C° = Temperatura; UR % = Umidade relativa do ar).

CAVERNA	Local da Colônia (L1)		Meio da caverna (L2)		Ambiente externo (L3)	
	C °	UR%	C °	UR%	C °	UR%
MJ_0005	18,9	87,8	18,3	89,1	18,7	87,9

Table 1 - Annual average temperature and humidity data for each sampling point (C° = Temperature; RH % = Relative humidity).

CAVE	Colony site (L1)		Middle of the cave (L2)		External environment (L3)	
	C °	RH%	C °	RH%	C °	RH%
MJ_0005	18,9	87,8	18,3	89,1	18,7	87,9

Observamos temperaturas médias significativamente mais elevadas quando comparamos os dados do *logger* instalado próximo à colônia (x 18,9°) em relação ao *logger* instalado no meio da caverna (x 18,3°) e do *logger* instalado no ambiente externo (x 18,7°) (Tabela 2). A temperatura do ambiente externo ((x)18,7°) se mostrou significativamente maior que a temperatura do meio da caverna (x 18,3°) (Tabela 2).

Significantly higher average temperatures were observed when the data from the logger installed near the colony (x 18.9°) was compared to the logger installed in the middle of the cave (x 18.3°) and the logger installed outside (x 18.7°) (Table 2). The external environment's temperature ((x)18.7°) was significantly higher than the temperature in the middle of the cave (x 18.3°) (Table 2).

Tabela 2 - Dados das médias anuais de temperatura e umidade de cada ponto amostral (C° = Temperatura; UR % = Umidade relativa do ar).

Locais de mediação de temperatura		MJ_0005	
L1	-	L2	W = 159; p < 2,2e-16
L1	-	L3	W = 148; p = 2,737e-13
L3	-	L2	W = 151; p < 2,2e-16

Table 2 – Average temperature values comparison between monitoring points.

Locais de mediação de temperatura			MJ_0005
L1	-	L2	W = 159; p < 2,2e-16
L1	-	L3	W = 148; p = 2,737e-13
L3	-	L2	W = 151; p < 2,2e-16

Com relação à umidade, a caverna MJ_0005 apresentou umidade significativamente menor no ponto junto à colônia (x 87,8%) quando comparado com o meio da caverna (x 89,1%) e ambiente externo (x 87,9%). Neste caso o meio da caverna apresentou umidade significativamente maior que o ponto do ambiente externo (Tabela 3).

Regarding humidity, MJ_0005 cave showed significantly lower humidity at the point next to the colony (x 87.8%) when compared to the middle of the cave (x 89.1%) and the external environment (x 87.9%). In this case, the middle of the cave had significantly higher humidity than the external environment (Table 3).

Tabela 3 – Comparação dos valores médios de umidade relativa do ar entre os locais de monitoramento.

Locais de mediação de temperatura			MJ_0005
L1	-	L2	W = 120, p < 2.2e-16
L1	-	L3	W = 133, p < 2.2e-16
L3	-	L2	W = 129, p < 2.2e-16

Table 3 – Average relative humidity values comparison between monitoring sites.

Temperature measurement sites			MJ_0005
L1	-	L2	W = 120, p < 2.2e-16
L1	-	L3	W = 133, p < 2.2e-16
L3	-	L2	W = 129, p < 2.2e-16

Caracterização do microclima da caverna no dia do incêndio

Todos os anos, a região do Quadrilátero Ferrífero é atingida por inúmeros incêndios florestais, em sua maioria de origem antrópica. Da mesma forma, a região da Serra do Rola Moça, local onde se encontra localizada a caverna MJ_0005, também sofre com estes distúrbios. Durante o ano de 2017, inúmeros incêndios foram observados na região, sendo que no dia 18 de setembro 2017, observamos que na área de estudo um incêndio de grandes proporções atingiu o local onde se encontra localizada a caverna MJ_0005 e todo seu entorno (Figura 3).

Cave's microclimate characterization on the day of the fire

Every year, the Iron Quadrangle region is hit by numerous forest fires, most of which are of anthropogenic origin. Similarly, the Serra do Rola Moça region, where MJ_0005 cave is located, also suffers from these disturbances. During 2017, numerous fires were observed in the region, and on September 18, 2017, a major fire in the study area hit the site of the MJ_0005 cave and all its surroundings (Figure 3).

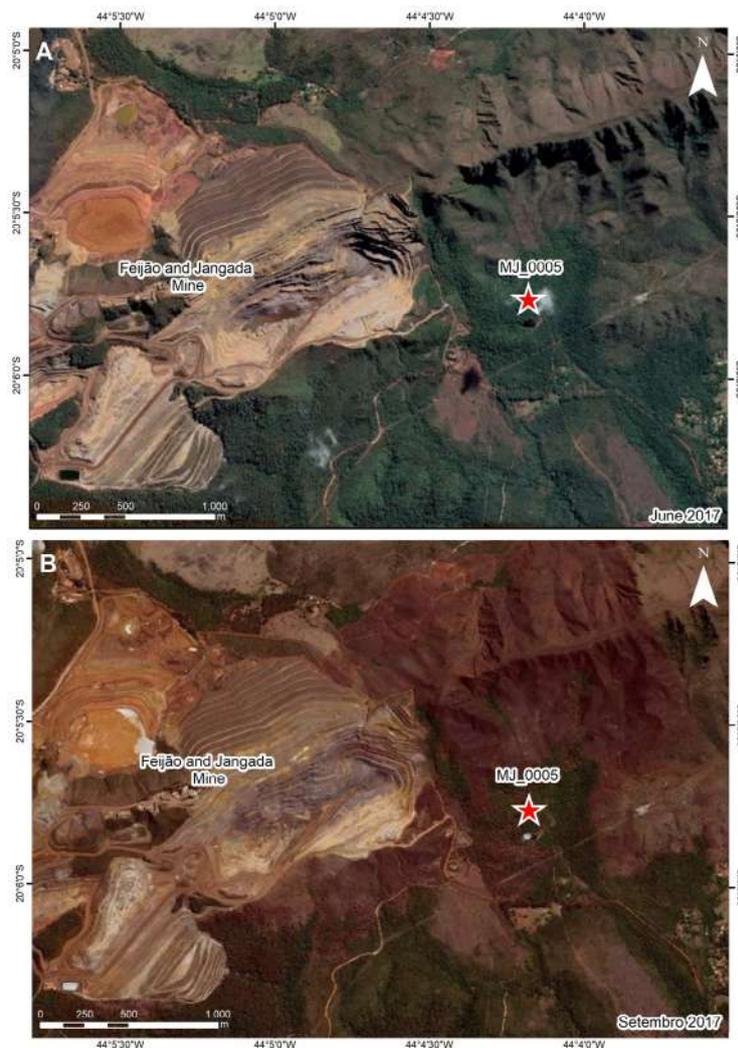


Figura 3 – A) Imagem da área onde está localizada a caverna MJ_0005 antes do incêndio; B) Área onde está localizada a caverna MJ_0005 e seu entorno após o incêndio.

Figure 3 – A) Image of the area where MJ_0005 cave is located before the fire; B) Area where MJ_0005 cave is located and its surroundings after the fire.

No dia do incêndio, a temperatura média do ambiente externo (x 22,6°C) apresentou-se expressivamente maior que as temperaturas médias da porção intermediária da caverna (x 18,3°C) e do ponto onde se encontra a colônia de morcegos (x 18,6°C) (Tabela 4) (Figura 4).

On the day of the fire, the external environment's average temperature (x 22.6°C) was significantly higher than the average temperatures in the middle part of the cave (x 18.3°C) and at the bat colony location (x 18.6°C) (Table 4) (Figure 4).



Figura 4 – A-B) Imagens da entrada a montante da caverna MJ_0005; C) Entrada a jusante, D) Entorno da caverna (imagens realizadas sete dias após o incêndio: 25/11/2017).

Figure 4 – A-B) Images of the upstream entrance to MJ_0005 cave; C) Downstream entrance, D) Cave surroundings (images taken seven days after the fire: 25/11/2017).

Tabela 4 – Médias de temperatura e umidade registradas em cada ponto amostral (C° = Temperatura; UR % = Umidade relativa do ar) no dia do incêndio.

CAVERNA	Local da Colônia (L1)		Meio da caverna (L2)		Ambiente externo (L3)	
	C °	UR%	C °	UR%	C °	UR%
MJ_0005	18,6	72,3	18,3	76	22,6	57

Table 4 – Temperature and humidity averages recorded at each sampling point (C° = Temperature; RH % = Relative humidity) on the day of the fire.

CAVE	Colony site (L1)		Middle of the cave (L2)		External environment (L3)	
	C °	RH%	C °	RH%	C °	RH%
MJ_0005	18,6	72,3	18,3	76	22,6	57

De acordo com os dados de temperatura e umidade registrados pelo *logger* instalado no ambiente epígeo (L3), o fogo se aproximou da caverna por volta das 5h30 da manhã e permaneceu neste ponto por aproximadamente duas horas (Anexo1). Por volta de 6h do dia do incêndio, a temperatura registrada próxima à caverna ultrapassou 46°C. A umidade baixou drasticamente, atingindo suas menores taxas às 6h00 horas da manhã no ambiente externo (20,7%) (Tabela 5).

According to the temperature and humidity data recorded by the logger installed in the epigeal environment (L3), the fire approached the cave at around 5.30 a.m. and remained at this point for approximately two hours (Appendix 1). At around 6 a.m. on the day of the fire, the temperature recorded near the cave exceeded 46°C. Humidity dropped dramatically, reaching its lowest levels at 6 a.m. in the external environment (20.7%) (Table 5).

Tabela 5 – Valores de temperatura e umidade registrados próximo ao horário do incêndio. Temp = Temperatura; umid = Umidade.

HORA	COLÔNIA (L1)		MEIO (L2)		EXTERNO (L3)	
	Temp	Umid	Temp	Umid	Temp	Umid
05h00	17,0	90,0	16,4	91,4	16,9	78,6
05h30	16,7	86,9	16,2	89,8	33,3	44,1
06h00	16,8	86,0	16,2	88,6	46,1	20,7
06h30	16,8	86,7	16,3	88,4	34,2	34,4
07h00	16,9	85,9	16,5	88,6	26,8	46,8
07h30	17,1	86,0	16,7	88,7	24,5	51,7
08h00	17,3	85,1	16,9	85,0	22,9	58,4

Table 5 – *Temperature and humidity values recorded around the time of the fire. Temp = Temperature; humid = Humidity.*

TIME	COLONY (L1)		MIDDLE (L2)		EXTERNAL (L3)	
	Temp	Humid	Temp	Humid	Temp	Humid
05h00	17,0	90,0	16,4	91,4	16,9	78,6
05h30	16,7	86,9	16,2	89,8	33,3	44,1
06h00	16,8	86,0	16,2	88,6	46,1	20,7
06h30	16,8	86,7	16,3	88,4	34,2	34,4
07h00	16,9	85,9	16,5	88,6	26,8	46,8
07h30	17,1	86,0	16,7	88,7	24,5	51,7
08h00	17,3	85,1	16,9	85,0	22,9	58,4

Vale ressaltar que quando comparadas as temperaturas registradas no dia do incêndio no ponto de amostragem L3 com as médias anuais podemos observar temperatura expressivamente maiores que as médias anuais. Da mesma forma, com relação à umidade relativa do ar, os valores observados no ponto L3 no dia do incêndio são significativamente menores que a média anual na área de estudo. No entanto, quando avaliada a temperatura e a umidade nos pontos da colônia (L1) e na porção intermediária da caverna (L2) não são observadas variações expressivas quando comparadas às médias anuais com os dados obtidos no dia do incêndio.

Considerando que o incêndio se aproximou da área onde está localizada a caverna entre 5h30 e 6h da manhã, a temperatura registrada na porção intermediária da caverna era de 16,4°C, enquanto no ponto onde se encontra a colônia de morcegos a temperatura era de 17,0°C e o *logger* instalado no ambiente externo registrava 33,3°C. Mesmo no momento em que o *logger*

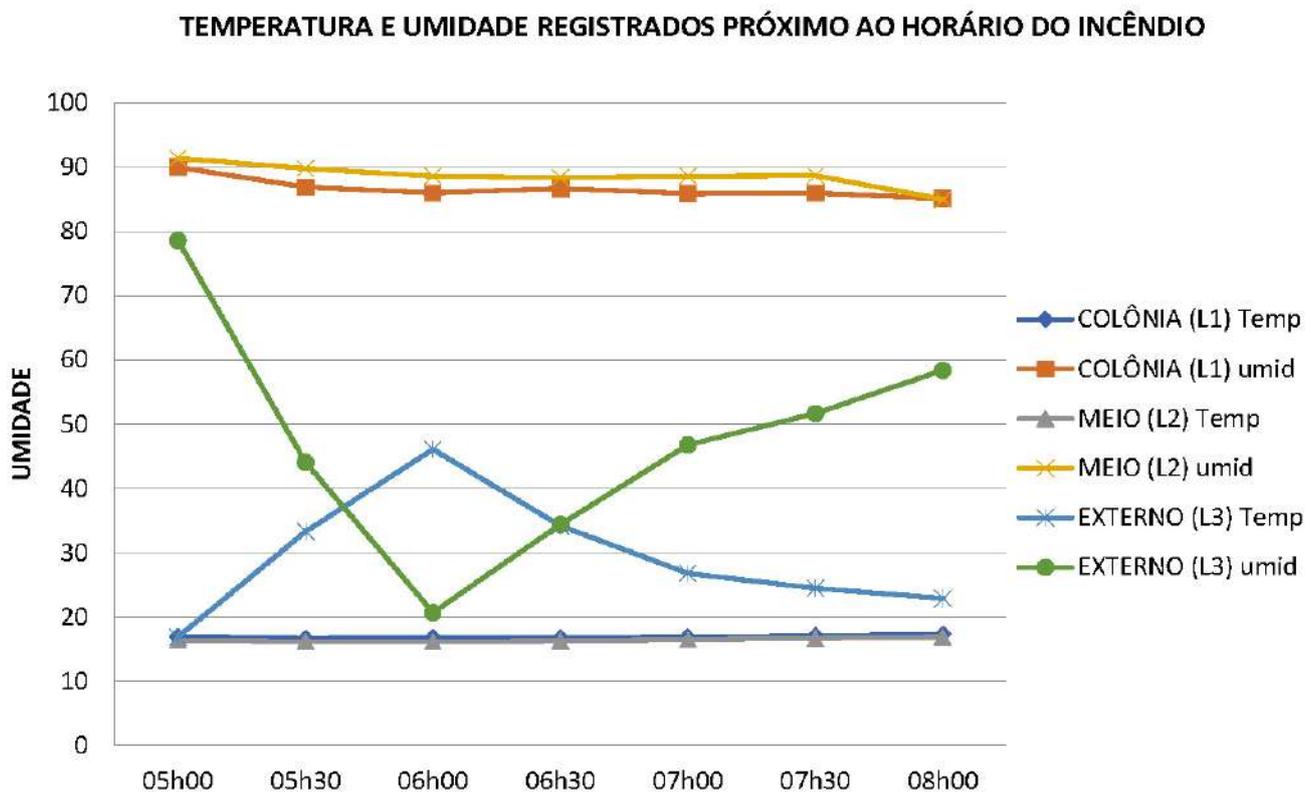
It is worth noting that when the temperatures recorded on the day of the fire at sampling point L3 are compared with the annual averages, significantly higher temperatures than the annual averages are observed. Similarly, regarding relative humidity, the values observed at point L3 on the day of the fire are significantly lower than the annual average in the study area. However, when evaluating the temperature and humidity at the colony points (L1) and in the middle of the cave (L2), there were no significant variations when comparing the annual averages with the data obtained on the day of the fire.

Considering that the fire approached the area where the cave is located between 5:30 and 6:00 a.m., the temperature recorded in the middle of the cave was 16.4°C, while at the bat colony location the temperature was 17.0°C and the logger installed outside recorded 33.3°C. Even when the external logger showed the highest temperature (46.1°C), the data observed near the colony and in the middle of the cave were lower than the annual

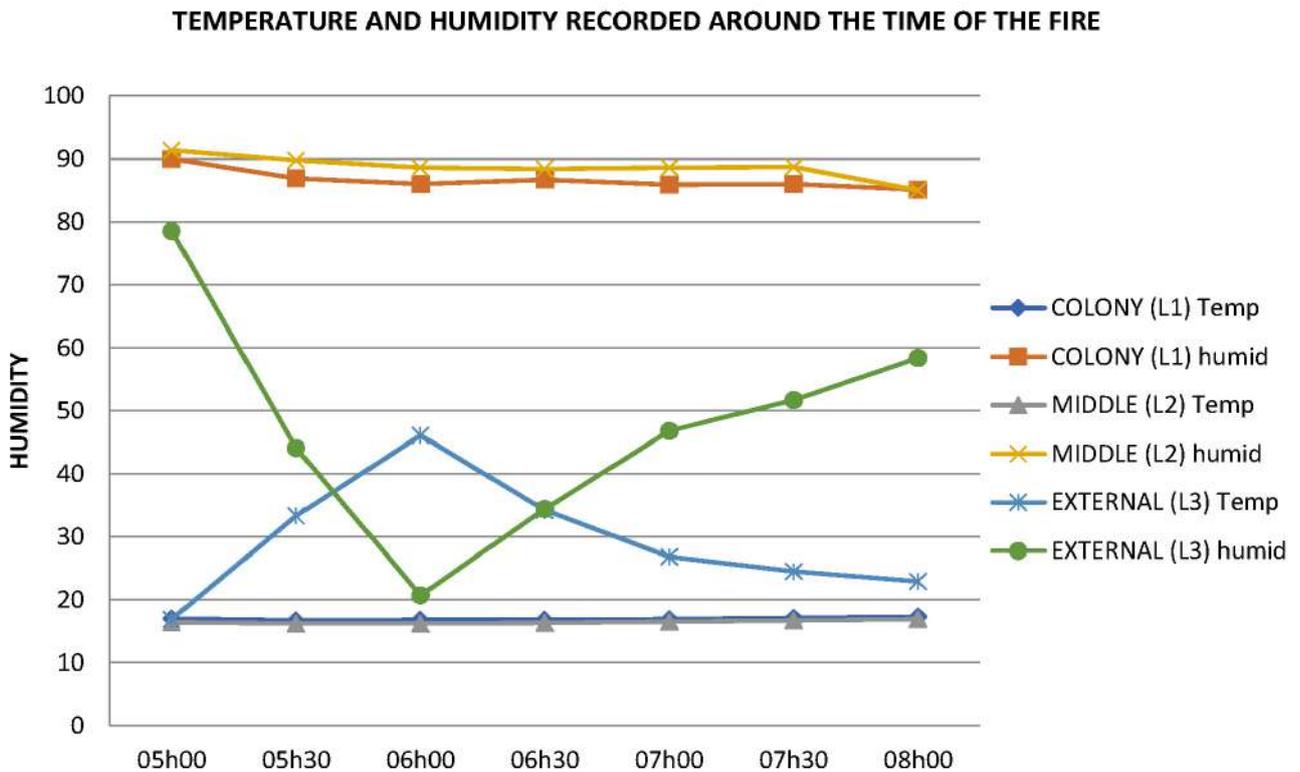
externo apresentou o maior valor de temperatura (46,1°C), os dados observados próximos à colônia e no centro da caverna são inferiores às médias anuais apresentadas. O mesmo padrão de comportamento apresentado pode ser observado quando avaliada a umidade no ponto da colônia e no meio da caverna, já que não foram registradas variações expressivas deste parâmetro no dia do incêndio (Gráfico 1).

averages shown. The same behavior pattern can be observed when evaluating the humidity at the colony's point and in the middle of the cave, since there were no significant variations in this parameter on the day of the fire (Graph 1).

Gráfico 1 – Valores de temperatura e umidade registrados próximo ao horário do incêndio. Temp = Temperatura; umid = Umidade.



Graph 1 – Temperature and humidity values recorded around the time of the fire. Temp = Temperature; humid = Humidity.



Sabidamente a caverna MJ_0005 é utilizada por uma colônia de *A. geoffroyi* como abrigo reprodutivo (REIS *et al.*, 2022). Nos primeiros meses do ano (janeiro a junho), a população é composta majoritariamente por indivíduos machos adultos. A partir de junho, ocorre a chegada das fêmeas ao abrigo, momento no qual a razão sexual se aproxima de 1:1. De agosto até outubro, a colônia passa a ser composta majoritariamente por fêmeas. Este momento corresponde ao período reprodutivo (cópulas e gestação) da população. Entre novembro e dezembro, as fêmeas ainda prenhes abandonam o abrigo. Este comportamento de segregação sexual dificulta inferências a respeito de uma eventual diminuição do número de indivíduos da caverna após o incêndio, uma vez que

*MJ_0005 cave is known to be used by an *A. geoffroyi* colony as a breeding shelter (REIS *et al.*, 2022). In the first few months of the year (January to June), the population is mainly made up of adult males. From June onwards, females arrive at the shelter, at which point the sex ratio approaches 1:1. From August until October, the colony is mostly made up of females. This time corresponds to the reproductive period (copulations and pregnancy) of the population. Between November and December, the still-pregnant females leave the shelter. This sexual segregation behavior makes it difficult to infer a possible decrease in the number of individuals in the cave after the fire, since there is already a natural decline in the months following the reproductive period. Even so, the estimated annual average number of individuals in MJ_0005 cave is*

naturalmente já ocorre um declínio natural nos meses que sucedem o período reprodutivo. Ainda assim, a estimativa da média anual do número de indivíduos na caverna MJ_0005 é de 3.653 morcegos e o número estimado observado para o mês de setembro logo após o incêndio foi de 3.983 (REIS *et al.*, 2022). Sendo assim, estudos de longa duração são necessários para o entendimento dos impactos causados pelos incêndios ao longo dos anos.

Finalmente pelos dados apresentados, podemos inferir que mesmo cavernas de pequenas dimensões podem representar abrigos importantes para a fauna cavernícola durante a ocorrência de incêndios florestais, sendo este inclusive um dos fatores que podem contribuir para a escolha do abrigo por estas espécies. Diferente de outros abrigos naturais comumente utilizados por morcegos como folhagens, troncos e pequenas fissuras nas rochas, a caverna MJ_0005 possibilitou a permanência e a sobrevivência da colônia na caverna mesmo durante oscilações expressivas de temperatura e umidade no ambiente epígeo. Desta forma, torna-se evidente que estes abrigos também podem representar refúgios importantes para a fauna em locais onde a incidência de distúrbios ambientais como os incêndios ocorrem de maneira constante, sendo, portanto um aspecto importante a ser avaliado em estudos de relevância espeleológica em regiões onde a disponibilidade de cavernas é restrita.

3,653 bats and the estimated number observed for the month of September, shortly after the fire was 3,983 (REIS et al., 2022). Therefore, long-term studies are necessary to understand the impacts caused by fires over the years.

Finally, from the presented data, it can be inferred that even small caves can be important shelters for cave fauna during forest fires, and that this is one of the factors that can contribute to the choice of shelter by these species. Unlike other natural shelters commonly used by bats, such as foliage, logs and small cracks in rocks, MJ_0005 cave allowed the colony to survive and remain in the cave even during significant fluctuations in temperature and humidity in the epigeal environment. Thus, it is clear that these shelters can also represent important refuges for fauna in places where environmental disturbances such as fires constantly occurs, and are therefore an important aspect to be evaluated in studies of speleological relevance in regions where the availability of caves is restricted.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a VALE S.A, representada pela Gerencia de Espeleologia por permitir o acesso até o local onde a caverna MJ-0005 está localizada e pelo apoio logístico. Agradecemos ao William Demétrio pela dedicação durante o estudo e ao Leopoldo Bernardi pelo incentivo para a elaboração do manuscrito. Somos gratos ao Fred Lott e ao Observatório Espeleológico pela realização de imagens aérea da área de estudo e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade ICMBio pela licença concedida.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank VALE S.A., represented by the Speleology Department, for allowing us access to the MJ_0005 cave site location and for their logistical support. We would also like to thank William Demétrio for his dedication during the study as well as Leopoldo Bernardi for encouraging us to write the manuscript. We are grateful to Fred Lott and the Speleological Observatory (Observatório Espeleológico) for taking aerial images of the study area and to the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade ICMBio) for the license granted.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AULER, A.S; PILÓ, L.B. Aspectos morfológicos e evolução de cavernas em minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ESTUDOS DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, 2, São Paulo. *Caderno de Resumos*. São Paulo: IG-USP, p. 8, 2007.

BAHIA, G, R.; FERREIRA, R. L. Influência das características físicoquímicas e da matéria orgânica de depósitos recentes de guano de morcego na riqueza e diversidade de invertebrados de uma caverna calcária. *Revista Brasileira de Zootecias*, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 168-180, 2005.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P.; YANEGA, D. Ecology of bat guano arthropod communities in a Brazilian dry cave. *Ecotropica*, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 105-116, 2000.

FOX, B.J. Fire and mammalian secondary succession in an Australian coastal heath. *Ecology* 63, p.1332-1341. 1982.

GARBINO, G. S. T.; GREGORIN, R.; LIMA LOUREIRO, I. P. L.; MORAS, L. M.; MORATELLI, R.; NOGUEIRA, M. R.; PAVAN, A. C.; TAVARES, V. C.; PERACCHI, A. L. *Updated checklist of Brazilian bats: versão 2020*. [S.l.]: Comitê da Lista de Morcegos do Brasil: Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros, 2020. Disponível em: <https://www.sbeq.net/lista-de-especies>. Acesso em: 04 out. 2020.

GNASPINI, P.; TRAJANO, E. Guano communities in tropical caves. In: WILKENS, H.; CULVER, D. C.; HUMPHREYS, W. F. (eds.). *Subterranean Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, p. 251- 268. 2000.

KUNZ, T. H. Roosting ecology. In: KUNZ, T. H. (ed.). *Ecology of bats*. New York; London: Plenum Press, 1982.

KUNZ, T. H.; LUMSDEN, L. F. Ecology of cavity and foliage roosting bats. In: KUNZ, T. H.; FENTON, M. B. (eds.). *Bat Ecology*. Chicago: The University of Chicago Press, 2003.

SUSAN C. LOEB, S.C.; BLAKEY, R.V. Bats and fire: a global review. *Fire Ecology*. 2021.

OLIVEIRA, H.F.; AGUIAR, L.M.S. The response of bats (Mammalia: Chiroptera) to an incidental fire on a gallery forest at a Neotropical savanna. *Biota Neotropica*. 2015.

ANEXO

Dados de temperatura e umidade relativa do ar registrado no dia do incêndio.

HORA	COLÔNIA (L1)		MEIO (L2)		EXTERNO (L3)	
	Temp	Umid	Temp	Umid	Temp	Umid
00:00	17,5	82,1	17,2	83,6	18,1	72,6
00:30	17,6	75,4	17,3	80,5	18,2	70,3
01:00	17,5	75,0	17,2	79,9	18,1	70,8
01:30	17,5	78,8	17,3	79,8	18,1	70,8
02:00	17,4	75,1	17,1	80,2	18,0	69,2
02:30	17,2	84,3	16,9	85,7	17,8	74,5
03:00	17,2	83,2	16,9	84,8	17,8	73,2
03:30	16,8	86,9	16,6	87,5	17,3	76,8
04:00	16,7	87,6	16,4	88,5	17,1	79,9
04:30	16,9	85,8	16,5	89,8	17,1	83,0
05:00	17,0	90,0	16,4	91,4	16,9	78,6
05:30	16,7	86,9	16,2	89,8	33,3	44,1
06:00	16,8	86,0	16,2	88,6	46,1	20,7
06:30	16,8	86,7	16,3	88,4	34,2	34,4
07:00	16,9	85,9	16,5	88,6	26,8	46,8
07:30	17,1	86,0	16,7	88,7	24,5	51,7
08:00	17,3	85,1	16,9	85,0	22,9	58,4
08:30	18,1	81,9	17,7	85,5	23,5	56,4
09:00	18,7	76,9	18,4	80,8	23,4	56,6
09:30	18,6	77,3	18,3	80,7	22,8	58,8
10:00	19,0	71,7	18,8	75,4	23,3	52,5
10:30	18,9	75,1	18,7	75,8	22,8	56,4
11:00	19,4	70,0	19,3	72,7	23,4	53,2
11:30	19,7	65,3	19,4	67,8	23,7	50,4

HORA	COLÔNIA (L1)		MEIO (L2)		EXTERNO (L3)	
	Temp	Umid	Temp	Umid	Temp	Umid
12:00	20,2	65,9	20,1	68,9	24,6	48,2
12:30	20,6	61,9	20,5	68,6	24,9	45,6
13:00	20,8	64,8	20,6	67,4	25,0	46,4
13:30	21,0	62,1	20,7	65,0	24,8	48,7
14:00	21,2	59,2	20,8	62,2	24,9	46,6
14:30	21,1	54,9	20,8	59,3	24,6	44,1
15:00	21,0	55,5	20,6	61,0	24,3	44,4
15:30	20,8	57,6	20,4	64,2	24,1	45,3
16:00	20,5	56,1	19,9	61,9	23,8	46,7
16:30	20,7	54,5	20,2	61,4	23,6	46,8
17:00	20,5	55,4	20,1	60,5	23,2	47,4
17:30	20,1	58,1	19,6	65,1	22,7	51,7
18:00	19,7	61,6	19,3	67,9	22,3	52,8
18:30	19,5	64,4	19,2	68,3	21,9	52,5
19:00	19,1	68,3	18,9	72,6	21,4	56,1
19:30	18,9	68,0	18,6	73,0	21,1	57,3
20:00	18,7	69,4	18,4	74,2	20,7	60,4
20:30	18,5	68,1	18,1	72,7	20,4	61,3
21:00	18,4	67,5	18,1	71,8	20,1	60,6
21:30	18,1	72,1	17,7	79,3	19,8	61,8
22:00	18,0	76,8	17,7	79,6	19,7	64,4
22:30	17,9	68,6	17,7	74,9	19,6	60,2
23:00	17,9	70,1	17,6	73,8	19,4	62,3
23:30	17,7	70,2	17,4	76,5	19,3	63,3

ANNEX

Temperature and relative humidity data recorded on the day of the fire.

TIME	COLONY (L1)		MIDDLE (L2)		EXTERNAL (L3)	
	Temp	Humid	Temp	Humid	Temp	Humid
00:00	17,5	82,1	17,2	83,6	18,1	72,6
00:30	17,6	75,4	17,3	80,5	18,2	70,3
01:00	17,5	75,0	17,2	79,9	18,1	70,8
01:30	17,5	78,8	17,3	79,8	18,1	70,8
02:00	17,4	75,1	17,1	80,2	18,0	69,2
02:30	17,2	84,3	16,9	85,7	17,8	74,5
03:00	17,2	83,2	16,9	84,8	17,8	73,2
03:30	16,8	86,9	16,6	87,5	17,3	76,8
04:00	16,7	87,6	16,4	88,5	17,1	79,9
04:30	16,9	85,8	16,5	89,8	17,1	83,0
05:00	17,0	90,0	16,4	91,4	16,9	78,6
05:30	16,7	86,9	16,2	89,8	33,3	44,1
06:00	16,8	86,0	16,2	88,6	46,1	20,7
06:30	16,8	86,7	16,3	88,4	34,2	34,4
07:00	16,9	85,9	16,5	88,6	26,8	46,8
07:30	17,1	86,0	16,7	88,7	24,5	51,7
08:00	17,3	85,1	16,9	85,0	22,9	58,4
08:30	18,1	81,9	17,7	85,5	23,5	56,4
09:00	18,7	76,9	18,4	80,8	23,4	56,6
09:30	18,6	77,3	18,3	80,7	22,8	58,8
10:00	19,0	71,7	18,8	75,4	23,3	52,5
10:30	18,9	75,1	18,7	75,8	22,8	56,4
11:00	19,4	70,0	19,3	72,7	23,4	53,2
11:30	19,7	65,3	19,4	67,8	23,7	50,4

TIME	COLONY (L1)		MIDDLE (L2)		EXTERNAL (L3)	
	Temp	Humid	Temp	Humid	Temp	Humid
12:00	20,2	65,9	20,1	68,9	24,6	48,2
12:30	20,6	61,9	20,5	68,6	24,9	45,6
13:00	20,8	64,8	20,6	67,4	25,0	46,4
13:30	21,0	62,1	20,7	65,0	24,8	48,7
14:00	21,2	59,2	20,8	62,2	24,9	46,6
14:30	21,1	54,9	20,8	59,3	24,6	44,1
15:00	21,0	55,5	20,6	61,0	24,3	44,4
15:30	20,8	57,6	20,4	64,2	24,1	45,3
16:00	20,5	56,1	19,9	61,9	23,8	46,7
16:30	20,7	54,5	20,2	61,4	23,6	46,8
17:00	20,5	55,4	20,1	60,5	23,2	47,4
17:30	20,1	58,1	19,6	65,1	22,7	51,7
18:00	19,7	61,6	19,3	67,9	22,3	52,8
18:30	19,5	64,4	19,2	68,3	21,9	52,5
19:00	19,1	68,3	18,9	72,6	21,4	56,1
19:30	18,9	68,0	18,6	73,0	21,1	57,3
20:00	18,7	69,4	18,4	74,2	20,7	60,4
20:30	18,5	68,1	18,1	72,7	20,4	61,3
21:00	18,4	67,5	18,1	71,8	20,1	60,6
21:30	18,1	72,1	17,7	79,3	19,8	61,8
22:00	18,0	76,8	17,7	79,6	19,7	64,4
22:30	17,9	68,6	17,7	74,9	19,6	60,2
23:00	17,9	70,1	17,6	73,8	19,4	62,3
23:30	17,7	70,2	17,4	76,5	19,3	63,3

**RELEVÂNCIA CULTURAL DO PATRIMÔNIO
ESPELEOLÓGICO E A POSSIBILIDADE DE SUA
TUTELA PELO TOMBAMENTO:
crítica ao posicionamento do IPHAN a partir
do estudo do caso da Paleotoca
na Serra do Gandarela/MG**

*SPELEOLOGICAL HERITAGE CULTURAL RELEVANCE
AND THE POSSIBILITY OF PROTECTING
IT THROUGH HERITAGE LISTING:
a critique of IPHAN's position based on the case
study of the Serra do Gandarela Paleoburrow in MG.*

Giselle Ribeiro de Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: giselleribeiro@mpmg.mp.br

RESUMO

O artigo objetiva analisar a decisão proferida pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) que inferiu o tombamento da Paleotoca situada na Serra do Gandarela, Minas Gerais, ao fundamento de que a inexistência de apropriações humanas do bem espeleológico impossibilitaria a valoração de sua relevância cultural. O assunto é enfrentado em argumentação teórica sob a ótica da Conservação Baseada em Valores, segundo a qual são os valores que dão significância para um bem, devendo ser analisados no caso concreto. Após pesquisa exploratória, defende que as

ABSTRACT

The article aims to analyze the decision handed down by the National Institute of Historical and Artistic Heritage (IPHAN), which declared the Paleoburrow located in Serra do Gandarela, Minas Gerais, not to be a listed monument, on the grounds that the lack of human appropriation of the speleological property would make it impossible to value its cultural relevance. The issue is tackled in a theoretical argument from the perspective of Value-Based Conservation, according to which it is the values that give significance to an asset and should be analyzed in the specific case. After exploratory research, it argues that caves

cavernas podem ser consideradas patrimônios natural e cultural e apresenta os valores que podem ser atribuídos especificamente à Paleotoca, garantindo sua significância cultural. Confronta a decisão do IPHAN com a legislação nacional, tendo a Constituição Federal como principal marco teórico, e critica a Portaria 375/2018, que estabelece a Política de Patrimônio Cultural Material da autarquia, sustentando o cabimento do tombamento do bem. Conclui que a decisão do IPHAN deixa de considerar a miríade de valores que podem ser atribuídos ao patrimônio espeleológico e paleontológico e, ao negar a relevância cultural de bens que não sejam objeto de usos culturais, a autarquia atua de forma inconstitucional.

PALAVRAS-CHAVE: patrimônio espeleológico, paleotoca, conservação baseada em valores, tombamento, patrimônio cultural, IPHAN.

INTRODUÇÃO

A conservação das cavernas, sítios espeleológicos e suas respectivas áreas de influência, tem como objetivo a manutenção destes ambientes e sistemas ecológicos sensíveis e diferenciados.

Não obstante conheça e reconheça a importância do patrimônio espeleológico, ao analisar o pedido de tombamento da cavidade natural AP0038 - consistente em uma Paleotoca, situada na Serra do Gandarela, Minas Gerais - o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) entendeu que a inexistência de apropriações humanas do local impossibilita a valoração de mérito cultural do bem. Com este fundamento, a autarquia federal entendeu que o tombamento não era instrumento apropriado para proteção da cavidade natural e negou-se

can be considered natural and cultural heritage and presents the values that can be attributed specifically to the Paleoburrow, guaranteeing its cultural significance. It confronts IPHAN's decision with national legislation, with the Federal Constitution as the main theoretical framework, and criticizes Ordinance 375/2018, which establishes the municipality's Material Cultural Heritage Policy, supporting the appropriateness of the asset's listing. It concludes that IPHAN's decision fails to do it considering the myriad of values that can be attributed to speleological and paleontological heritage and, by denying the cultural relevance of assets that are not the object of cultural uses, the authority acts unconstitutionally

KEYWORDS: speleological heritage, paleoburrow, value-based conservation, heritage listing, cultural heritage, IPHAN.

INTRODUCTION

The conservation of caves, speleological sites and their respective areas of influence aims to maintain these sensitive and differentiated environments and ecological systems.

Despite knowing and recognizing the importance of speleological heritage, when analyzing the application for the listing of cave AP0038 - consisting of a Paleoburrow, located in the Serra do Gandarela, Minas Gerais - the National Institute of Historical and Artistic Heritage (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN) understood that the lack of human appropriation of the site makes it impossible to value the cultural merit of the asset. On this basis, the federal authority took the view that heritage listing was not an appropriate instrument for protecting the natural cavity

a fazer a proteção, argumentando que esta caberia a outras entidades da Administração Pública, como ICMBio (MINAS GERAIS, 2021). A decisão reflete o entendimento do IPHAN sobre os limites de sua atuação no que tange ao patrimônio espeleológico e paleontológico, consolidado na Portaria 375/2018.

Problema posto, o presente artigo visa a enfrentar a decisão da autarquia para, em última análise, criticar a Política de Patrimônio Material do IPHAN quanto ao patrimônio espeleológico em argumentação teórica sob a ótica da Conservação Baseada em Valores, segundo a qual são os valores que dão significância para um bem, devendo ser observados no caso concreto.

Para tanto, inicialmente será apresentado o caso em estudo, trazendo-se as características específicas da cavidade e sítio paleontológico, definindo-se a singularidade do bem, e apresentando-se o entendimento externado pelo IPHAN sobre a impossibilidade de realizar a proteção do bem como patrimônio. Em pesquisa exploratória, na discussão do caso, o artigo apresentará o conceito de patrimônio natural e a tendência internacional em reconhecer a inter-relação entre ele e o patrimônio cultural, analisando o enquadramento do patrimônio espeleológico. Em seguida, tratará da significância cultural dos bens e dos valores que podem ser atribuídos aos bens naturais, especialmente à Paleotoca. Por fim, confronta a decisão do IPHAN com a legislação nacional, tendo a Constituição Federal como principal marco teórico, defendendo o cabimento do instituto do tombamento para a conservação do bem e que o entendimento esposado pelo IPHAN não encontra respaldo nos padrões e princípios de melhores práticas para a conservação de lugares e objetos de importância patrimonial.

and refused to protect it, arguing that this would fall to other public administration entities, such as ICMBio (MINAS GERAIS, 2021). The decision reflects IPHAN's understanding of the limits of its action with regard to speleological and paleontological heritage, consolidated in Ordinance 375/2018.

With the problem posed, this article aims to dissuade the decision of the local authority and, ultimately, criticize IPHAN's Material Heritage Policy with regard to speleological heritage in a theoretical argument from the perspective of Value-Based Conservation, according to which it is the values that give significance to an asset and that must be observed in the specific case.

To this end, the case study will initially be presented, including the specific characteristics of the cave and paleontological site, defining the uniqueness of the asset, and presenting IPHAN's understanding of the impossibility of protecting the asset as a heritage site. In discussing the case, the article will present the concept of natural heritage and the international trend to recognize the interrelationship between it and cultural heritage, analyzing the framework of speleological heritage. It will then deal with the cultural significance of assets and the values that can be attributed to natural assets, especially the Paleoburrow. Finally, it confronts IPHAN's decision with national legislation, with the Federal Constitution as the main theoretical framework, defending the appropriateness of the heritage listing instrument for the conservation of the asset and that the understanding espoused by IPHAN is not supported by the standards and principles of best practice for the conservation of places and objects of heritage importance.

EXPOSIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

Durante os estudos de prospecção espeleológica para instrução do processo de licenciamento ambiental de empreendimentos mine-rários, na porção noroeste do quadrilátero ferrífero, sinclinal Gandarela, divisa dos municí-pios de Caeté e Santa Bárbara, em Minas Gerais, foi identificada a existência de uma paleotoca, a qual foi denominada AP-038 – doravante também referida como Paleotoca Serra do Gandarela ou simplesmente Paleotoca.

A definição de “caverna”, dada pela legislação brasileira atualmente pelo Decreto 10.035/2022, não restringe essa denominação a cavidades originadas por determinados processos natu-rais, motivo pelo qual as paleotocas podem ser chamadas de cavidades naturais quando seu porte permite o enquadramento na defi-nição legal. Paleotocas são raras no registro geológico (BITTENCOURT *et al.*, 2015). Trata-se de estruturas de bioerosão – ou seja, esca-vação realizadas por animais, mamíferos fossor-iais gigantes, que habitavam a América do Sul durante os períodos Terciário e Quaternário -, encontradas na forma de túneis ou galerias em rochas alteradas ou não (BUCHMANN *et al.*, 2015; CARMO *et al.*, 2011). Dentro das galerias deste tipo de estruturas, é possível observar vestígios que trazem evidências do compor-tamento desses animais, como as marcas das garras durante a escavação, marcas da impressão da carapaça, e marcas de polimento durante a passagem do animal pela galeria (CARMO *et al.*, 2011). Como registro paleonto-lógico, são consideradas icnofósseis, ou seja, estruturas biogênicas fósseis que evidenciam algum comportamento do organismo produtor (MCILROY, 2004). São, portanto, valiosas fontes

CASE STUDY

The existence of a paleoburrow was identified during the speleological prospecting studies for the environmental licensing process in the Gandarela syncline, northwestern portion of the Iron Quadrangle. The Paleoburrow, which is located on the border of the municipalities of Caeté and Santa Bárbara, in Minas Gerais, was named AP-038 - henceforth also referred to as Paleoburrow Serra do Gandarela or simply Paleoburrow.

*The definition of “cave”, currently given in Brazilian legislation by Decree 10.035/2022, does not restrict this denomination to cavities originated by certain natural processes, which is why paleoburrows can be called caves when their size allows them to fit into the legal definition. Paleoburrows are rare in the geological record (BITTENCOURT *et al.*, 2015). They are bioerosion structures - that is, excavations carried out by animals, giant fossorial mammals, which inhabited South America during the Tertiary and Quaternary periods - found in the form of tunnels or galleries in altered or unaltered rocks (BUCHMANN *et al.*, 2015; CARMO *et al.*, 2011). Within the galleries of this type of structure, it is possible to observe traces that provide evidence of the behavior of these animals, such as claw marks during excavation, carapace impression marks, and polishing marks during the animal's passage through the gallery (CARMO *et al.*, 2011). As a pale-ontological record, they are considered ichnofos-sils, i.e. fossil biogenic structures that show some behavior of the producing organism (MCILROY, 2004). They are therefore valuable sources for paleoecological and paleobiological studies of the possible species that formed them (BUCHMANN; LOPES; CARON *et al.*, 2013).*

para estudos paleoecológicos e paleobiológicos das possíveis espécies que as formaram (BUCHMANN; LOPES; CARON *al.*, 2013).

A paleotoca associada à cavidade AP-38 constitui um registro deste tipo de estrutura, o primeiro para a região do Quadrilátero Ferrífero (QF) e uma nova referência de túneis escavados em sistemas ferruginosos - no caso saprolitos associados a depósitos de canga, no topo da Serra, sequência de litotipos ferríferos associados à Formação Cauê (Grupo Itabira, Supergrupo Minas) (RUCHKYS; BITTENCOURT; BUCHMANN, 2014). Esta paleotoca é um raro testemunho da presença da megafauna extinta de mamíferos - milodontídeos cavadores ou preguiças gigantes - no QF, provavelmente na era cenozoica, o que é evidenciado pela forma arredondada dos túneis principais, associado com a ocorrência de várias marcas de garras nas paredes e tetos. Com 345 metros, a Paleotoca da Serra do Gandarela tem dimensões notáveis em extensão, sendo uma das maiores paleotocas conhecidas até o momento (ASSIS e CASTRO, 2022). Para além da gênese rara e morfologia única, a Paleotoca abriga cinco espécies troglomórficas, sendo duas espécies de aranhas (*Lygromma sp.vov.1* e *Tisentnops mineiro*), duas espécies de colêmbolos (*Arrhopalites sp.nov.1* e *Pseudosinella sp.nov.1*) e uma espécie de opilião (*Spinopilar sp.nov.1*) (MINAS GERAIS, 2021); destas, apenas a *Tisentnops mineiro* já havia sido descrita em artigo científico e a *Arrhopalites sp.nov.1* é considerada rara (MINAS GERAIS, 2021).

As peculiaridades desta cavidade natural chamaram a atenção da comunidade científica, tendo sido produzidos estudos específicos sobre o bem. Suas características, ainda, motivaram que organizações da sociedade civil e a Secretaria Municipal de Turismo, Cultura e Desenvol-

*The paleoburrow associated with cavity AP-38 is a record of this type of structure, the first on the Quadrilátero Ferrífero (QF) region and a new reference for tunnels excavated in ferruginous systems. In this case it is inserted in saprolites associated with canga deposits at the top of the ridge, a sequence of ferruginous lithotypes associated with the Cauê Formation (Itabira Group, Minas Super-group) (RUCHKYS; BITTENCOURT; BUCHMANN, 2014). This paleoburrow is a rare testimony to the presence of extinct mammalian megafauna - Mylodon or giant sloths - in the QF, probably in the Cenozoic era, which is evidenced by the rounded shape of the main tunnels, associated with the occurrence of several claw marks on the walls and ceilings. With 345 meters, the Serra do Gandarela Paleoburrow has remarkable dimensions in terms of length, and is one of the largest paleoburrows known to date (ASSIS and CASTRO, 2022). In addition to its rare genesis and unique morphology, the Paleoburrow is home to five troglomorphic species, two of which are spiders (*Lygromma sp.vov.1* and *Tisentnops mineiro*), two species of springtails (*Arrhopalites sp.nov.1* and *Pseudosinella sp.nov.1*) and one species of opilione (*Spinopilar sp.nov.1*) (MINAS GERAIS, 2021). Of these species, only *Tisentnops mineiro* had already been described in a scientific paper and *Arrhopalites sp.nov.1* is considered rare (MINAS GERAIS, 2021).*

The peculiarities of this cave have drawn the attention of the scientific community, and specific studies have been produced. Its characteristics also motivated civil society organizations and Santa Bárbara's Municipal Department of Tourism, Culture and Economic Development to encourage IPHAN to recognize the cultural value of the Paleoburrow and have it listed.

vimento Econômico de Santa Bárbara provocassem o IPHAN a reconhecer o valor cultural da Paleotoca e realizar o seu tombamento.

Instaurados processos administrativos na Autarquia, houve consulta ao DEPAM - Departamento de Patrimônio Material e Fiscalização - acerca da pertinência do uso do instrumento do tombamento para preservação do Distrito Espeleológico Serra do Gandarela, bem como do seu enquadramento em face à nova política do Patrimônio Cultural Material (PPCM), Portaria nº 375/2018. A coordenadora-geral de identificação e reconhecimento do Departamento manifestou-se no seguinte sentido, conforme verifica-se do ofício n. 1946/2020/DIVAP/IPHAN-MG:

Assim, analisando os documentos, verificamos tratar-se de sítio espeleológico no qual pesquisas buscam verificar o grau de raridade das cavidades.

No entanto, não há informação sobre apropriação humana que permita fazer avaliação de sua relevância cultural.

Portanto, somente caberá ao Iphan reconhecer valor no caso de comprovada apropriação cultural de relevância nacional e não apenas por ser testemunho da megafauna, ou como possibilidade ainda não comprovada de presença humana.

Isso não impede a realização de pesquisas arqueológica, tampouco, a preservação do sítio por meio de legislação específica já citada (MINAS GERAIS, 2021, Peça de ID: 4100023244)

Já no Parecer Técnico 275/2020/COTEC/IPHAN-MG, referente à recomendação remetida pelo Ministério Público de Minas Gerais para que houvesse o acatamento federal para a Paleotoca da Serra do Gandarela, o IPHAN reconhece a importância científica do bem e, inclusive, a necessidade da incidência de alguma forma de

Once administrative proceedings had been initiated at the Autarchy, the Department of Material Heritage and Inspection (Departamento de Patrimônio Material e Fiscalização - DEPAM) was consulted about the pertinence of using the instrument of listing to preserve the Serra do Gandarela Speleological District, as well as its classification in light of the new Material Cultural Heritage Policy, Ordinance No. 375/2018. The Department's general coordinator for identification and recognition stated the following, as can be seen in official letter no. 1946/2020/DIVAP/IPHAN-MG:

Thus, by analyzing the documents, we can see that this is a speleological site where research seeks to verify the rarity degree of the caves.

However, there is no information on human appropriation that would allow an assessment of its cultural relevance.

Therefore, it will only be up to IPHAN to recognize value in the case of proven cultural appropriation of national relevance and not just because it bears witness to megafauna, or as an as yet unproven possibility of human presence.

This does not prevent archaeological research from being carried out, nor does it prevent the preservation of the site by means of the specific legislation already mentioned (MINAS GERAIS, 2021, Piece ID: 4100023244).

In Technical Opinion 275/2020/COTEC/IPHAN-MG, referring to the recommendation sent by the Public Prosecutor's Office of Minas Gerais for federal protection of the Serra do Gandarela Paleoburrow, IPHAN recognizes the scientific importance of the

acautelamento federal do bem. No entanto, assim se manifestou:

Nessa direção está a questão que atravessa a solicitação de acautelamento ora em apreço: constituem-se as “paleotocas” em bens culturais abrangidos pelas prerrogativas constitucionais atribuídas ao IPHAN? (...)

Nunca chegou a ser objeto de debate, até onde seja possível localizar, o estabelecimento de um “Patrimônio Cultural de natureza espeleológica”. (...)

Mais recentemente, o Capítulo VI da Política de Patrimônio Cultural - Do Patrimônio Espeleológico - estabeleceu uma diretriz geral, seguindo a Constituição Federal, que considera as cavidades naturais como “patrimônio da União. Entretanto, as cavidades não são consideradas como objetos de interesse do IPHAN per se. Sua avaliação e proteção e, segundo a legislação atualmente em vigor, atribuição do IBAMA e do Instituto Chico Mendes de Proteção da Biodiversidade, conforme o Decreto nº 6640/2008 (MINAS GERAIS, 2021, Peça de ID: 4100023246)

No parecer técnico 321/2020/COTEC IPHAN-MG/ IPHAN-MG o IPHAN concluiu:

Destarte, o Parecer Técnico 275/2020 aponta a inadequação do instrumento do tombamento para proteção de cavidades. Posto que inexistente a apropriação humana da cavidade, a mesma não é passível de iniciar o processo de valoração, como apontado na recomendação emitida pelo DEPAM, através do DESPACHO 22.2019 CGID/DEPAM (0989045) (MINAS GERAIS, 2021, Peça de ID: 4100023246).

Com esses fundamentos e, considerando “a inexistência de apropriações humanas, que possibilitem a sua valoração de mérito cultural”,

asset and even the need for some form of federal protection. However, this is what it said:

In this direction is the question that runs through the request for protection now under consideration: do the “paleoburrows” constitute cultural assets covered by the constitutional prerogatives attributed to IPHAN? (...)

The establishment of a “Cultural Heritage of a speleological nature” has never been the subject of debate, as far as can be located. (...)

More recently, Chapter VI of the Cultural Heritage Policy - On Speleological Heritage - established a general guideline, following the Federal Constitution, which considers natural cavities to be federal heritage. However, caves are not considered objects of interest to IPHAN per se. Under current legislation, their assessment and protection is the responsibility of IBAMA and the Chico Mendes Institute for Biodiversity Protection, in accordance with Decree 6640/2008 (MINAS GERAIS, 2021, Piece ID: 4100023246).

In technical opinion 321/2020/COTEC IPHAN-MG/ IPHAN-MG, IPHAN concluded:

Thus, Technical Opinion 275/2020 points out the inappropriateness of the listing instrument for protecting caves. Since there is no human appropriation of the cave, it is not eligible to start the valuation process, as pointed out in the recommendation issued by DEPAM, through DESPACHO 22.2019 CGID/DEPAM (0989045) (MINAS GERAIS, 2021, Piece ID: 4100023246).

On these grounds, and considering that “there is no human appropriation that would allow it to be considered of cultural merit”, as well as that

bem como que “há outros instrumentos legais e administrativos adequados, que não o tombamento federal” (MINAS GERAIS, 2021, Peça de ID: 4100023246), o parecer final foi pelo indeferimento do pedido de tombamento da Paleotoca.

Com isso, a cavidade natural ficou desprovida de acautelamento formal.

A paleotoca tampouco conta com proteção através de instrumentos ambientais: a área onde se situa a cavidade em questão foi retirada da poligonal inicialmente proposta pelo ICMBio para o Parque Nacional da Serra do Gandarela, não sendo abrangida pela Unidade de Conservação (RUCHKYS; BITTENCOURT; BUCHMANN, 2014); ademais, embora a cavidade possa ser classificada como de máxima relevância, com o advento do Decreto n. 10.935/2022, que revogou o Decreto 99.556/1990, a princípio, nenhuma cavidade natural subterrânea conta com proteção integral, sendo qualquer delas passível de impactos negativos irreversíveis¹.

Lado outro, a paleotoca encontra-se em permanente ameaça, já que está na área prevista como diretamente afetada para o empreendimento minerário Apolo, da Vale S.A. (RUCHKYS; PEREIRA; PEREIRA, 2015) e não conta com restrição de acesso ou vigilância.

DISCUSSÃO DO CASO

No processo administrativo que culminou com o indeferimento do pedido de tombamento da Paleotoca, o IPHAN entendeu que, se não houver apropriação humana do sítio, o bem não seria passível de valoração relevância cultural.

¹ Consigne-se que o artigo 4º e 6º encontram-se com eficácia suspensa liminarmente pelo STF, no bojo da ADPF 935. Enquanto perdurarem os efeitos da decisão, as cavidades de máxima relevância não poderão sofrer impactos negativos irreversíveis.

“there are other appropriate legal and administrative instruments other than federal listing” (MINAS GERAIS, 2021, Part ID: 4100023246), the final opinion was to reject the Paleoburrow’s application for listing.

As a result, the cave was left without formal protection.

The paleoburrow does not have protection through environmental instruments either, the area where the cave is located was removed from the initially proposed polygonal by ICMBio for the Serra do Gandarela National Park, and is not covered by the Conservation Unit (RUCHKYS; BITTENCOURT; BUCHMANN, 2014). Moreover, although the cave can be classified as being of maximum relevance, with the advent of Decree no. 10.935/2022, which repealed Decree 99.556/1990, at first, no natural underground cave has full protection, and any of them can be subject to irreversible impacts.¹.

On the other hand, the paleoburrow is under permanent threat, as it has no access restrictions, or surveillance and is in the area planned to be directly affected by Vale S.A.’s Apolo mining project (RUCHKYS; PEREIRA; PEREIRA, 2015).

CASE DISCUSSION

In the administrative process that culminated in the rejection of the Paleoburrow’s application for listing, IPHAN’s viewpoint was that, if there were no human appropriation of the site, the property would not be eligible for cultural significance.

¹ It should be noted that Articles 4 and 6 have been suspended by the Supreme Court, in the context of ADPF 935. As long as the effects of the decision last, the maximum relevance caves cannot suffer irreversible negative impacts.

A decisão proferida decorre da aplicação da Portaria IPHAN 375, de 19 de setembro de 2018, referente ao patrimônio espeleológico, segundo a qual:

Art. 85. Ao Iphan, quando provocado por órgão competente, caberá manifestação sobre a relevância histórico-cultural ou religiosa, portanto apropriação humana, das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional.

Art. 86. Apenas quando constatada a existência de valores referentes à identidade, à ação, à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira, caberá ao Iphan, utilizando os instrumentos de Reconhecimento e Proteção disponíveis, preservar bens espeleológicos. (IPHAN, 2018)

Analisando os pareceres proferidos ao longo do processo que culminou no indeferimento do tombamento da Paleotoca e o disposto na mencionada portaria, fica claro que o IPHAN apenas avalia mérito cultural, ou seja, realiza avaliação de relevância cultural de bens espeleológicos se houve prévia apropriação humana do bem entendida como apropriação cultural ou “uso cultural” passado (sítio arqueológico) ou presente (local de realização de atividades humanas tradicionais). Ainda se observa que a importância científica ou paleontológica de uma caverna não a torna objeto de interesse para autarquia.

A conjugação dessas informações explicita o entendimento do IPHAN, mais do que sobre os limites de seu campo de atuação, sobre a tipologia de bens materiais que teria relevância ou significação cultural em âmbito nacional. O presente artigo analisará se o entendimento esposado pelo IPHAN encontra respaldo nos padrões e princípios de melhores práticas para a conservação de lugares e objetos de importância patrimonial ou na legislação nacional.

The decision was based on the application of IPHAN Ordinance 375, of September 19, 2018, on speleological heritage, according to which:

Art. 85 - Iphan, when provoked by a competent body, shall be responsible for expressing an opinion on the historical, cultural or religious relevance, and therefore human appropriation, of the natural underground cavities existing in the national territory.

Art. 86: Only when the existence of values referring to the identity, action and memory of the different groups that make up Brazilian society is verified, will Iphan be responsible for preserving speleological assets, using the available Recognition and Protection instruments. (IPHAN, 2018)

Analyzing the opinions issued during the process and the statements of the aforementioned ordinance, is clear that IPHAN only assesses cultural merit. That is, it only assesses the cultural relevance of speleological assets if there has been prior human appropriation of the asset, understood as cultural appropriation or “cultural use” in the past (archaeological site) or present (place where traditional human activities take place). It should also be noted that the scientific or paleontological importance of a cave does not make it an object of interest for the autarky.

This information explains IPHAN’s understanding, rather than the limits of its field of action, of the typology of material assets that would have cultural relevance or significance at a national level. This article will analyze whether IPHAN’s understanding is supported by the best practice standards and principles for the conservation of heritage places and objects or by national legislation.

Cavernas como patrimônio natural e cultural

Inicialmente, defende-se que a separação de bens, para fins de conservação, em patrimônios natural e cultural é artificial e ultrapassada, além de tornar mais difícil se atingir soluções sustentáveis para problemas complexos (ROSSLER, 2005). Embora a dicotomia natureza-cultura tenha evoluído para constituir domínios de conhecimento separado, hoje existe a crescente compreensão de que os sítios patrimoniais não são constituídos por atributos naturais ou culturais isolados, divididos em realidades separadas, mas sim que essas realizadas são entrelaçadas. Assim, especialmente depois da segunda metade do século XX, organismos internacionais têm promovido mudanças nas políticas de conservação do patrimônio natural, partindo de avaliações naturais exclusivas para abordagens naturais-culturais mais holísticas (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019).

A Convenção de 1972 para Proteção do Patrimônio Mundial da UNESCO traz o conceito mundialmente reconhecido para o patrimônio natural, que considera a biodiversidade e a geodiversidade, abarcando: (1) monumentos naturais constituídos por formações físicas e biológicas ou por um conjunto destas formações, que tenham valor do ponto de vista estético ou científico; (2) formações geológicas e fisiográficas e as zonas estritamente delimitadas que constituam habitat de espécies animais e vegetais ameaçados, com valor do ponto de vista da ciência ou da conservação; (3) sítios naturais ou áreas naturais estritamente delimitadas detentoras de um valor excepcional do ponto de vista da ciência, da conservação ou da beleza natural (UNESCO, 1972). O conceito adotado na Convenção da UNESCO foi inspiração para o apresentado pela

Caves as natural and cultural heritage

Initially, it is argued that separating assets for conservation purposes into natural and cultural heritage is artificial and outdated, as well as making it more difficult to achieve sustainable solutions to complex problems (ROSSLER, 2005). Although the nature-culture dichotomy has evolved to constitute separate domains of knowledge, today there is a growing understanding that heritage sites are not made up of isolated natural or cultural attributes, divided into separate realities, but rather that these realities are intertwined. Thus, especially since the second half of the 20th century, international organizations have promoted changes in natural heritage conservation policies, moving from exclusive natural assessments to more holistic natural-cultural approaches (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019).

The 1972 UNESCO Convention Concerning the Protection of the World Heritage brings the globally recognized concept of natural heritage, which considers biodiversity and geodiversity. This concept encompasses: (1) natural features consisting of physical and biological formations or groups of such formations, which are of outstanding universal value from the aesthetic or scientific point of view; (2) geological and physiographical formations and precisely delineated areas which constitute the habitat of threatened species of animals and plants of outstanding universal value from the point of view of science or conservation; (3) natural sites or precisely delineated natural areas of outstanding universal value from the point of view of science, conservation or natural beauty (UNESCO, 1972). The concept adopted in the UNESCO Convention was the inspiration for

Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance para o patrimônio natural:

Patrimônio natural significa: – Características naturais que consistem em formações físicas e biológicas ou grupos de tais formações, que demonstrem significado natural; – Formações geológicas e fisiográficas e áreas precisamente delimitadas que constituem o habitat de espécies indígenas de animais e plantas, que demonstrem importância natural, e/ou – Sítios naturais ou áreas naturais delimitadas com precisão que demonstrem importância natural do ponto de vista da ciência, conservação ou beleza natural (CAIRNES, AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE, 2002, p. 8) (tradução nossa).

A Convenção de 1972 reconhece também os locais de patrimônio cultural e misto, sendo que, em 1992, tornou-se o primeiro instrumento legal internacional a reconhecer a interação significativa entre os seres humanos e o meio ambiente, prevendo as paisagens culturais (RÖSSLER, 2005).

A ligação inextricável entre natureza, sociedade e cultura foi defendida por Posey (1999), na publicação *Cultural and Spiritual Values of Biodiversity*. Segundo Mallarach e Verschuuren:

O patrimônio natural e o patrimônio cultural não podem ser considerados isoladamente. As evidências da interdependência e das relações entre os seres humanos e o meio ambiente justificam novas conceituações e a necessidade de adotar abordagens integradas e coordenadas para a conservação do patrimônio (Latour 2011). (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019, p.153) (tradução nossa)

that presented by the Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance:

Natural heritage means: natural features consisting of physical and biological formations or groups of such formations, which demonstrate natural significance; – geological and physiographical formations and precisely delineated areas that constitute the habitat of indigenous species of animals and plants, which demonstrate natural significance, and/or natural sites or precisely-delineated natural areas which demonstrate natural significance from the point of view of science, conservation or natural beauty (CAIRNES, AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE, 2002, p. 8)

The 1972 Convention also recognizes cultural and mixed heritage sites, and in 1992 it became the first international legal instrument to recognize the significant interaction between human beings and the environment, encompassing cultural landscapes (RÖSSLER, 2005).

*The inextricable link between nature, society and culture was defended by Posey (1999) in the publication *Cultural and Spiritual Values of Biodiversity*. According to Mallarach and Verschuuren:*

Natural heritage and cultural heritage cannot be considered in isolation. The evidence for interdependence and the relationships between humans and the environment justify new conceptualizations and the need to adopt integrated, coordinated approaches to the conservation of heritage (Latour 2011). (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019, p.153)

Neste mesmo sentido, a Promessa de Sydney - produto do Congresso Mundial de Parques da *International Union for Conservation of Nature* de 2014 - abriu o caminho para as Jornadas de Cultura da Natureza, referindo-se ao significado cultural e espiritual da natureza, e gerou recomendações para que o Patrimônio Mundial desenvolva métodos para reconhecer a interconexão do significado natural, cultural, social e espiritual dos sítios do Patrimônio Mundial (IUCN, 2015).

Também o ICOMOS - no compromisso *Yatra aur Tammanah*, produto da Assembleia Geral em Delhi (2017) - reconheceu os domínios natural e cultural como inseparáveis, entrelaçados e mutuamente constituídos, cunhando o termo "*naturecultures*", que abrange e incluindo conceitos como a diversidade biocultural, geodiversidade e agrobiodiversidade, e as múltiplas perspectivas de disciplinas e visões de mundo (ICOMOS, 2017).

Aderindo a este entendimento, nas "Orientações Técnicas para a aplicação da Convenção para a Proteção do Patrimônio Mundial, Cultural e Natural", ao apontar os critérios para avaliação do Valor Universal Excepcional - entendido como "uma importância cultural e/ou natural tão excepcional que transcende as fronteiras nacionais e se reveste de uma importância comum para as gerações atuais e futuras de toda a humanidade" (UNESCO, 2022, p.24) -, a UNESCO sinaliza tipologia de bens que podem ser considerados Patrimônio da Humanidade, sem diferenciar os atributos para o patrimônio cultural e para o patrimônio natural², sendo de se destacar, para o caso em análise:

In the same sense, the Sydney Promise - a product of the International Union for Conservation of Nature's 2014 World Parks Congress - paved the way for the Culture of Nature Days. This events referred to the cultural and spiritual significance of nature, and generated recommendations for World Heritage to develop methods to recognize the interconnectedness of the natural, cultural, social and spiritual significance of World Heritage sites (IUCN, 2015).

ICOMOS also - in the Yatra aur Tammanah commitment, a product of the General Assembly in Delhi (2017) - recognized the natural and cultural domains as inseparable, intertwined and mutually constituted, coining the term "naturecultures", which encompasses and includes concepts such as biocultural diversity, geodiversity and agrobiodiversity, and the multiple perspectives of disciplines and worldviews (ICOMOS, 2017).

Adhering to this understanding, in the "Operational Guidelines for the Implementation of the Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage ", when pointing out the criteria for evaluating the Outstanding Universal Value - understood as "a cultural and/or natural importance so exceptional that it transcends national boundaries and is of common importance for present and future generations of all humanity" (UNESCO, 2022, p.24) - UNESCO outlines a typology of assets that can be considered World Heritage Sites, without differentiating the attributes for cultural heritage and natural heritage:². It is worth noting for the present case:

² A partir da decisão proferida na 6ª sessão ordinária do Comitê do Patrimônio Mundial (Decisão 6 EXT.COM 5.1)

² Based on the decision taken at the 6th ordinary session of the World Heritage Committee (Decision 6 EXT.COM 5.1)

(viii) ser exemplos excepcionais representativos dos grandes estádios da história da Terra, nomeadamente testemunhos da vida, de processos geológicos significativos em curso no desenvolvimento

de formas terrestres ou de elementos geomórficos ou fisiográficos de grande significado;

(ix) ser exemplos excepcionais representativos de processos ecológicos e biológicos significativos em curso na evolução e desenvolvimento de ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos, e de comunidades de plantas e de animais;

(x) conter os habitats naturais mais importantes e significativos para a conservação in situ da diversidade biológica, nomeadamente aqueles em que sobrevivem espécies ameaçadas que tenham um Valor Universal Excepcional do ponto de vista da ciência ou da conservação. (UNESCO, 2022, p. 32).

(viii) be outstanding examples representing major stages of earth's history, including the record of life, significant on-going geological processes in the development of landforms, or significant geomorphic or

physiographic features;(ix) be outstanding examples representing significant on-going ecological and biological processes in the evolution and development of terrestrial, fresh water, coastal and marine ecosystems and communities of plants and animals;

(x) contain the most important and significant natural habitats for in-situ conservation of biological diversity, including those containing threatened species of Outstanding Universal Value from the point of view of science or conservation. (UNESCO, 2022, p. 32).

Larsen e Wijesuriya (2015) afirmam que esta tendência de se estabelecer conexões entre natureza e cultura não é acidental, mas sim um sinal dos questionamentos ao modelo de património adotado. Em suma, os autores defendem que há uma nova dinâmica no sentido de reconsiderar os limites entre natureza e cultura como:

- integrado e conectado no local de isolados;
- constituída em termos relacionais e não de forma única e diferenciada;
- uma rede dinâmica de processos em lugar de elementos fixos;
- um campo para experimentar intercâmbio e aprendizado mútuos (LARSEN; WIJESURIYA, 2015, p. 9) (tradução nossa)

Larsen and Wijesuriya (2015) state that this trend of establishing connections between nature and culture is not accidental, but rather a sign of the questioning of the adopted heritage model. In short, the authors argue that there is a new dynamic towards reconsidering the boundaries between nature and culture as:

- *integrated and connected instead of isolated;*
- *constituted in relational terms and not in a unique and differentiated way;*
- *a dynamic network of processes rather than fixed elements;*
- *a field for experiencing mutual exchange and learning (LARSEN; WIJESURIYA, 2015, p.9)*

Visto isso, em relação às cavernas, além de sua importância em razão do potencial de armazenamento de minerais raros ou formações geoló-

Having said that, caves are important for many factors, such as the potential for storing rare minerals or differentiated geological formations,

gicas diferenciadas, como os espeleotemas; por sua relação com a questão hidrológica, seja em relação à sua própria formação, seja como locais de armazenamento de água e recarga de aquíferos; em razão do fato de servirem como *habitats* de espécies endêmicas, raras e, inclusive, ameaçadas de extinção, tanto da fauna como da flora; também verifica-se sua relevância, por exemplo, por sua capacidade de armazenamento de informações relativas aos processos geológicos, viabilizando pesquisas sobre a origem, formação e sucessivas transformações da litologia local e do paleoclima outrora ocorrido em determinada região; pela potencialidade de conservação da pré-história através dos depósitos fossilíferos (sítios paleontológicos) e arqueológicos, que tendem a ser mais conservados nesses ambientes, em razão da menor antropização; pelo fato de poderem exercer o papel de importantes fontes de atividades como turismo e lazer, além de poderem abrigar manifestações sociais como celebrações e cultos religiosos; etc. (PILÓ; AULER, 2019).

Assim, cavernas e sítios paleontológicos podem ser enquadradas em diferentes categorias do patrimônio natural e cultural (LOBO; BOGGIANI, 2013), merecendo tutela integral por instrumentos de ambos os campos.

Não obstante, a patrimonialização é uma construção social que envolve a atribuição e o reconhecimento dos valores atribuídos a um bem (AVRAMI; MASON; DE LA TORRE, 2000; ASHWORTH, 1994). Não há patrimônio sem valor e os valores sempre foram a razão por trás da conservação do patrimônio, já que nenhuma sociedade se esforçaria em proteger o que não tem valor (DE LA TORRE, 2002). Assim, no processo de definição das feições geológicas e

such as speleothems, also to their relationship with hydrological issues, in relation to their own formation, or as places for storing water and recharging aquifers. In addition, they serve as habitats for endemic, rare and even endangered species of both fauna and flora. Moreover, they are also important, because of their capacity to store information on geological processes, enabling research into the origin, formation and successive transformations of local lithology and the paleoclimate of a given region. Furthermore, they have the potential for preserving prehistory through fossil deposits (paleontological sites) and archaeological sites, which tend to be better preserved in these environments due to less anthropization. Finally; the fact that they can play the role of important sources of activities such as tourism and leisure, as well as being home to social events such as celebrations and religious services; etc. (PILÓ; AULER, 2019).

Thus, caves and paleontological sites can fall into different categories of natural and cultural heritage (LOBO; BOGGIANI, 2013), deserving full protection by instruments from both fields.

Nevertheless, heritage is a social construction that involves the attribution and recognition of the values of an asset (AVRAMI; MASON; DE LA TORRE, 2000; ASHWORTH, 1994). There is no heritage without value and values have always been the reason behind heritage conservation, since no society would make the effort to protect what has no value (DE LA TORRE, 2002). Therefore, in the process of defining the geolo-

amostras que venham a ser consideradas como patrimônio, é necessário apurar os valores específicos de cada ocorrência.

Significância cultural da paleotoca

No contexto da conservação, os valores são as qualidades, características, percepções ou associações conferidas a um bem, que podem diferenciá-las dos demais, dotando-lhes de significado (AVRAMI; MANSON, 2019).

A Carta ICOMOS da Austrália para Locais de Significado Cultural, também conhecida como Carta de Burra, aborda a questão da conservação baseada em valores, igualando os conceitos de valor do patrimônio cultural, significância do patrimônio cultural e significância cultural (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013a). Segundo o documento, a significância cultural seria a soma das qualidades ou valores que um lugar tem, que devem ser identificados e levados em conta para a conservação do sítio, para as gerações passadas, presentes ou futuras (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013a). Nas palavras de VERSCHUUREN *et al.*,

Os valores são muitas vezes equiparados à significância. O termo significância é geralmente usado para se referir à soma de todos os valores patrimoniais atribuídos a um objeto ou lugar e sua avaliação “é muitas vezes realizada em várias escalas: internacional, nacional, regional e local” (Feary *et al.*, 2015, p. 107). Ou seja, a significância refere-se aos significados e valores que fazem uma característica cultural, lugar, paisagem ou paisagem aquática importante. Por sua vez, uma avaliação de

gical features and samples that will be considered heritage, it is necessary to ascertain the specific values of each occurrence.

Cultural significance of the Paleoburrow

In the context of conservation, values are the qualities, characteristics, perceptions or associations conferred to an asset, which can differentiate them from others, endowing them with meaning (AVRAMI; MANSON, 2019).

*The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance, also known as the Burra Charter, addresses the issue of value-based conservation, equating the concepts of cultural heritage value, cultural heritage significance and cultural significance (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a). According to the document, cultural significance would be the sum of the qualities or values that a place has, which must be identified and taken into account for the conservation of the site, for past, present or future generations (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a). In the words of VERSCHUUREN *et al.*,*

*Values are often equated with significance. The term significance is generally used to refer to the sum of all the heritage values assigned to an object or place and its assessment “is often conducted at several scales: international, national, regional and local” (Feary *et al.*, 2015, p. 107). That is, significance refers to the meanings and values that make a natural or cultural feature, place, landscape or waterscape important. In turn a significance assessment is a process of studying and understanding the meanings and values of a place and*

significância é um processo de estudar e compreender os significados e valores de um lugar e normalmente é a base para o desenvolvimento de políticas para informar e orientar a gestão e governança desse local (VERSCHUUREN *et al.*, 2021, p.20). (tradução nossa)

Assim sendo, a pesquisa sobre a existência de valores que possam ser atribuídos à Paleotoca da Serra do Gandarela seria atividade cogente para definição da sua significância cultural.

Embora não seja tarefa fácil categorizar-se os valores do patrimônio – em razão das diferenças epistemológicas e de compreensão entre os vários ramos de conhecimento e pessoas que lidam com o patrimônio, entre outros fatores –, a comunidade conservadorista concebe certas tipologias a fim de organizar o conhecimento, facilitar a discussão e orientar as escolhas dos profissionais de métodos de avaliação apropriados para uma ampla gama de valores patrimoniais (MANSON, 2002).

O Artigo 1.2 da Carta de Burra (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013a) fala em valores estéticos, históricos, científicos, sociais e espirituais, ressaltando que todos os aspectos do significado cultural e natural devem ser identificados e levados em consideração, sem se dar ênfase injustificada a qualquer dos valores (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013a, artigos 1.2 e 5.1). Assim, se por um lado, a Carta aponta para existência de valores diretamente relacionados a uma apropriação humana de um sítio - como os valores social e espiritual, referentes à importância do bem para um grupo de pessoas, sua identidade, emoção ou tradição –, por outro lado, elenca outros valores não necessariamente ligados a esta questão. Segundo o documento de apoio da Carta de Burra, *Understanding and Asses-*

is typically the basis for developing policy to inform and guide the management and governance of that place. (VERSCHUUREN et al., 2021, p.20).

Therefore, research into the existence of values that can be attributed to the Serra do Gandarela Paleoburrow would be a cogent activity for defining its cultural significance.

It is no easy task to categorize heritage values, due to epistemological differences and the different understandings between the various branches of knowledge and people who deal with heritage, among other factors. Nevertheless, the conservation community has devised certain typologies in order to organize knowledge, facilitate discussion and guide professionals' choices of appropriate evaluation methods for a wide range of heritage values (MANSON, 2002).

*Article 1.2 of the Burra Charter (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a) talks about aesthetic, historical, scientific, social and spiritual values, stressing that all aspects of cultural and natural significance must be identified and taken into account, without undue emphasis being placed on any one value (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a, articles 1.2 and 5.1). While on the one hand, the Charter points to the existence of values directly related to human appropriation of a site - such as social and spiritual values, referring to the importance of the asset for a group of people, their identity, emotion or tradition - on the other hand, it lists other values not necessarily linked to this issue. According to the supporting document of the Burra Charter, *Understanding and Assessing Cultural Significance* (ICOMOS AUSTRALIA, 2013b), historical value, for example, refers, among other things, to the fact that the place is associated*

sing Cultural Significance (ICOMOS AUSTRALIA, 2013b), o valor histórico, por exemplo, refere-se, dentre outros aspectos, ao fato de o lugar ser associado a um importante evento ou tema na história e geralmente é subjacente a todos os demais, já que pode abranger todos os aspectos da história. A seu turno, o valor científico

refere-se ao conteúdo de informação de um lugar e sua capacidade de revelar mais sobre um aspecto do passado por meio de exame ou investigação do lugar, incluindo o uso de técnicas arqueológicas. É provável que o valor científico relativo de um lugar dependa da importância das informações ou dados envolvidos, em sua raridade, qualidade ou representatividade, e sua potencial para contribuir com mais informações importantes sobre o próprio lugar ou um tipo ou classe de lugar ou para abordar questões de pesquisa importantes (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013b, p.3). (tradução nossa)

Manson (2002), na obra *Assessing the Values of Cultural Heritage* – resultado de pesquisas relacionadas sobre valores e benefícios do patrimônio cultural realizadas pelo *Getty Conservation Institute* –, propõe uma tipologia provisória de valores patrimoniais dividida em dois grandes grupos, quais sejam, (a) valores socioculturais, que comportam os históricos, cultural/simbólico, social, espiritual/religioso e estético; e (b) valores econômicos, abarcando valores de uso e de não uso. Segundo esta classificação, o valor histórico estaria na raiz da própria noção de patrimônio - já que “a capacidade de um sítio de transmitir, incorporar ou estimular uma relação ou reação ao passado faz parte da natureza e do significado fundamentais dos objetos patrimoniais” (MANSON, 2002, p.11) – e abrange o valor educacional/acadêmico, que consiste na capacidade de o sítio gerar conhecimento sobre

with an important event or theme in history and generally underlies all the others, since it can cover all aspects of history.

Scientific value refers to the information content of a place and its ability to reveal more about an aspect of the past through examination or investigation of the place, including the use of archaeological techniques. The relative scientific value of a place is likely to depend on the importance of the information or data involved, on its rarity, quality or representativeness, and its potential to contribute further important information about the place itself or a type or class of place or to address important research questions (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013b, p.3).

In Assessing the Values of Cultural Heritage - the result of research into the values and benefits of cultural heritage carried out by the Getty Conservation Institute, Manson (2002), proposes a provisional typology of heritage values divided into two large groups. Those are, (a) socio-cultural values, which include historical, cultural/symbolic, social, spiritual/religious and aesthetic values; and (b) economic values, encompassing use and non-use values. According to this classification, historical value would be at the root of the very notion of heritage, since “the capacity of a site to transmit, incorporate or stimulate a relationship or reaction to the past is part of the fundamental nature and meaning of heritage objects” (MANSON, 2002, p.11). That would encompass educational/academic value, which consists of the site’s capacity to generate knowledge about the past. On the other hand, when dealing with values from an economic

o passado. Lado outro, ao tratar de valores sob o ponto de vista econômico, Manson (2002) ressalta que, se por um lado, existem valores de uso de um bem, por outro lado, existe valor também no não-uso, seja porque as pessoas valorizam o bem pela sua mera existência (valor de existência), seja porque desejam deixar um legado para as futuras gerações (valor de legado).

Especificamente sobre a significância cultural de bens naturais, o guia *Cultural and Spiritual Significance of Nature*, produzido pela *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* (IUCN), explica que a significância cultural e espiritual da natureza tem sido definida como valores, sentimentos, ideias, associações e significados – sejam eles espirituais, culturais, inspiradores, estéticos, históricos ou sociais - que as características naturais e a natureza em geral revelam e inspiram nos indivíduos ou grupos sociais (VERSCHUUREN et al., 2021).

Partindo do pressuposto de que a significância da natureza é baseada em diferentes e variados valores – cuja interação pode ser complexa e, inclusive, conflituosa -, a IUCN apresenta uma classificação baseada na *Convention for the Protection and Safeguarding of the Intangible Heritage*, na *Millennium Ecosystem Assessment* e no *Manual on the Intangible Heritage* da Espanha, que fala dos seguintes valores: (a) estético, perceptivo ou cênico; (b) recreacional e terapêutico; (c) artístico, tradicional e contemporâneo; (d) tradição linguística; (e) religioso e espiritual; (f) histórico; (g) de informação, conhecimento e educação. Quanto aos últimos, que nos interessam para fins deste artigo, o documento aponta os seguintes atributos e qualidades que transmitem esses valores:

point of view, Manson (2002) points out that, while there are values in the use of an asset, there is also value in non-use, either because people value the asset for its mere existence (existence value) or because they want to leave a legacy for future generations (legacy value).

The Cultural and Spiritual Significance of Nature guide, produced by the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), defines the cultural and spiritual significance of nature as the values, feelings, ideas, associations and meanings that natural features and nature in general reveal and inspire in individuals or social groups. While these significance can be spiritual, cultural, inspirational, aesthetic, historical or social (VERSCHUUREN et al., 2021).

Based on the assumption that the significance of nature is identified on different and varied values - whose interaction can be complex and even conflicting - the IUCN has presented a classification based on the Convention for the Protection and Safeguarding of the Intangible Heritage, the Millennium Ecosystem Assessment and the Manual on the Intangible Heritage of Spain. The classification speaks of the following values: (a) aesthetic, perceptual or scenic; (b) recreational and therapeutic; (c) artistic, traditional and contemporary; (d) linguistic tradition; (e) religious and spiritual; (f) historical; (g) information, knowledge and education. As for the latter, which is of interest for the purposes of this article, the document points out the following attributes and qualities that convey these values:

Conhecimento científico é baseado em observações de espécies, formações geológicas e paisagem, e monitorando o meio ambiente. O conhecimento científico é concebido sob diferentes ontologias e paradigmas científicos, mas pode ser avaliado com a ajuda de outras partes interessadas. Pense, por exemplo, na ciência cidadã e nas percepções de visitantes de áreas protegidas ou conhecimento ecológico tradicional baseado em observações ao longo de muitas gerações.

Valor educacional de ecossistemas particulares, condições ambientais, clima, características e atributos naturais ou espécies específicas e seus comportamentos. Valores educacionais valores podem ser comunicados, por exemplo, por meio de interpretação no local, caminhadas, e através de escolas e organizações de conservação (VERSCHUUREN *et al.*, 2021, p.24). (tradução nossa)

*Scientific knowledge is based on observations of species, geological formations and landscape, and by monitoring the environment. Scientific knowledge is devised under different scientific ontologies and paradigms, but can be assessed with the help of other stakeholders. Think, for example, of citizen science and the perceptions of visitors of protected areas or traditional ecological knowledge based on empirical observations throughout many generations. Educational value of particular ecosystems, environmental conditions, the climate, natural features and attributes or specific species and their behaviours. Educational values can be communicated through, for example, on-site interpretation, guided walks, and through schools and conservation organisations. (VERSCHUUREN *et al.*, 2021, p.24).*

A seu turno, Satterfield (2002) extrai do livro *Conserving Natural Values*, de Rolston, diversos valores que podem ser atribuídos a bens naturais, especialmente aqueles que, como a Paleotoca, guardam espécie rara da fauna brasileira. Destaca-se os seguintes valores: (a) de sustentabilidade ecológica (valorização do desenvolvimento que não comprometa a integridade do ecossistema); (b) de suporte para a vida; (c) histórico/ evolucionário (valorização do lugar como registro de processos passados - formação geológica da terra - e como sistema em evolução); (d) de biodiversidade (valorização da preservação da biodiversidade expressa em variedade e raridade de espécies); (e) intrínseco, ou seja, valor inerente à natureza em si, não porque serve a alguma necessidade humana, biológica ou ecológica.

*For his part, Satterfield (2002) extracts from Rolston's book *Conserving Natural Values*, various values that can be attributed to natural assets, especially those that, like the Paleoburrow, contain rare species of Brazilian fauna. The following values stand out: (a) ecological sustainability (valuing development that does not compromise the integrity of the ecosystem); (b) support for life; (c) historical/ evolutionary (valuing the place as a record of past processes - the geological formation of the earth - and as an evolving system); (d) biodiversity (valuing the preservation of biodiversity expressed in the variety and rarity of species); (e) intrinsic, i.e. value inherent in nature itself, not because it serves some human, biological or ecological need.*

Alguns dos mencionados valores são positivados na *Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance*, que define o “significado natural” justamente como sendo “a importância dos ecossistemas, da biodiversidade e da geodiversidade, pelo valor da sua existência, ou em termos do seu valor científico, social, estético e de suporte de vida para as gerações atual e futuras” (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002, p.9).

Resta claro, portando, que existe uma miríade de valores que podem ser atribuídos aos bens materiais naturais.

Partindo dessa matriz complexa, analisando-se os valores que podem ser atribuídos à Paleotoca Serra do Gandarela, observa-se que os estudos trazidos ao processo demonstraram que a caverna possui gênese rara, que contribui para a compreensão dos processos de formação e ocupação pré-histórica da Terra, o que demonstra seus valores histórico/evolucionário, científico e de informação, conhecimento e educação; o fato de ser hospedagem de exemplares únicos da fauna brasileira (troglóbio raro) demonstra seus valores de sustentabilidade ecológica, de suporte para a vida, de biodiversidade (valorização da preservação da biodiversidade expressa em variedade e raridade de espécies); inegável ainda seu valor intrínseco, de existência e de legado.

O estudo desenvolvido por Ruchkys, Bittencourt e Buchmann (2014) fala sobre valores desta cavidade natural:

Considerando os critérios e parâmetros elencados por Cachão *et al.* (1998), do ponto de vista científico a paleotoca da Serra do Gandarela pode ser enqua-

Some of these values are mentioned in the Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance, which defines “natural significance” precisely as “the importance of ecosystems, biodiversity and geodiversity for their existence value or for present or future generations, in terms of their scientific, social, aesthetic and life-support value.” (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002, p.9).

It is clear, therefore, that there is a myriad of values that can be attributed to natural material assets.

Based on this complex matrix, analyzing the values that can be attributed to the Serra do Gandarela Paleoburrow, it can be seen that the studies brought to the process have shown that the cave has a rare genesis. This contributes to understanding the processes of formation and prehistoric occupation of the Earth, which demonstrates its historical/evolutionary, scientific, knowledge and education values. The fact that it is home to unique specimens of Brazilian fauna (rare troglóbites) demonstrates its ecological sustainability, life support and biodiversity values (valuing the preservation of biodiversity expressed in the variety and rarity of species); its intrinsic, existence and legacy value are also undeniable.

The study carried out by Ruchkys, Bittencourt and Buchmann (2014) talks about the values of this cave:

*Considering the criteria and parameters listed by Cachão *et al.* (1998), from a scientific point of view the Serra do Gandarela paleoburrow can be classified within the*

drada nos parâmetros paleoecológico, estratigráfico e geológico. (...)

Em relação aos critérios pedagógicos o geossítio apresenta os parâmetros de potencial pedagógico e didático. Muito embora não possa ser estruturado para receber visitação devido a sua fragilidade, podem ser adotadas medidas de valorização e utilização pedagógica como, por exemplo, uma visita virtual. (...)

Considerando os critérios culturais pôde se verificar que a paleotoca tem os parâmetros valor ambiental natural e situação sócio-geográfica uma vez que está localizada na Serra do Gandarela um importante patrimônio geoambiental do QF de grande apelo estético. A paleotoca apresenta valores científicos e culturais integrando a memória bio/geológica do QF sendo necessária a preservação e integridade de seus valores garantindo a transmissão dos mesmos para as futuras gerações. (p. 257-258).

paleoecological, stratigraphic and geological parameters (...)

With regard to the pedagogical criteria, the geosite has the parameters of pedagogical and didactic potential. Although it cannot be structured to receive visitors due to its fragility, measures can be adopted to enhance its value and educational use, such as a virtual tour. (...)

Considering the cultural criteria, it can be seen that the paleoburrow has the parameters of natural environmental value and socio-geographical situation, since it is located in the Serra do Gandarela, an important geo-environmental heritage of the QF with great aesthetic appeal. The paleoburrow has scientific and cultural values, integrating the bio/geological memory of the QF, and the preservation and integrity of its values is necessary, guaranteeing their transmission to future generations (p. 257-258).

Todos esses valores apontam para a significância cultural concreta do sítio.

All these values point to the concrete cultural significance of the site.

Reconhecimento do valor cultural de sítios naturais na legislação nacional

O entendimento do IPHAN sobre quais bens materiais componentes do patrimônio espeleológico e paleontológico não podem ser objeto de valoração cultural e, portanto, reconhecidos como bens culturais, se não forem objeto de apropriação humana ou uso cultural, tampouco encontra respaldo na legislação nacional brasileira.

Muitos países criaram políticas separadas para conservação do patrimônio natural e cultural, incluindo diferentes legislações, administrações, métodos, linguagens, disciplinas científicas e práticas (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019).

Cultural value recognition of natural sites in national legislation

IPHAN's understanding that assets that make up the speleological and paleontological heritage cannot be the object of cultural valuation and therefore recognized as cultural assets, if they are not the object of human appropriation or cultural use, is not supported by Brazilian national legislation.

Many countries have created separate policies for the conservation of natural and cultural heritage, including different legislation, administrations, methods, languages, scientific disciplines and practices (MALLARACH; VERSCHUUREN, 2019), however, this is not the case in Brazil. Although the legal entities responsible for protecting the

No entanto, não é o que se assiste no Brasil já que, embora as pessoas jurídicas responsáveis pela proteção do meio ambiente natural e do meio ambiente cultural, em certas esferas federativas, sejam distintas – como acontece em âmbito federal –, é certo que a legislação prevê valor cultural para sítios naturais.

A Constituição Federal de 1988 previu as cavidades naturais como bens da União (art. 20, X), parte do patrimônio cultural da Nação brasileira, de acordo com o artigo 216, inciso V. Percebe-se da leitura do dispositivo constitucional que, para além de importantes ambientes naturais, as cavidades naturais subterrâneas são consideradas bens culturais por se tratar de sítios de valor histórico, ecológico e científico (BRASIL, 1988). A previsão do patrimônio espeleológico como sítio ecológico de relevância cultural encontra-se, inclusive, expressa no artigo 3º da Resolução CONAMA 004/87 (BRASIL, 1987).

Outrossim, a Constituição brasileira prevê expressamente que se incluem no rol de patrimônio cultural brasileiro os sítios de valor paleontológico (BRASIL, 1988, V).

Ao relacionar os sítios de valor paisagístico, paleontológico e ecológico no artigo 216, a Carta Magna reconhece que, inclusive, os bens naturais são portadores de referência à identidade, à ação, à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira.

Assim, como ressaltado por Scifoni (2008), no Brasil o patrimônio natural não se opõe, mas compõe o patrimônio cultural em sua noção ampliada, tratando-se de mais uma categoria que compõe o conjunto do patrimônio cultural, junto com as demais, como é o caso do edificado, o imaterial, o arqueológico.

natural environment and the cultural environment, in certain federal spheres, are different, it is true that the legislation provides for cultural value for natural sites.

The 1988 Federal Constitution declares natural caves as federal property (art. 20, X) and part of the cultural heritage of the Brazilian nation, in accordance with article 216, item V. It is clear from reading the constitution that, in addition to being important natural environments, underground caves are considered cultural assets because they are sites of historical, ecological and scientific value (BRASIL, 1988). The inclusion of speleological heritage as an ecological site of cultural importance is even expressed in article 3 of CONAMA Resolution 004/87 (BRASIL, 1987).

Furthermore, the Brazilian Constitution expressly states that sites of paleontological value are included in the list of Brazilian cultural heritage (BRASIL, 1988, V).

By listing sites of landscape, paleontological and ecological value in Article 216, the Constitution recognizes that natural assets are also a reference to the identity, action and memory of the different groups that make up Brazilian society.

As Scifoni (2008) pointed out, natural heritage in Brazil is not opposed to cultural heritage, but is part of it in its broadest sense. It is yet another category that makes up the whole of cultural heritage, along with others, such as the buildings, the intangible and the archaeological.

De fato, adotando-se um ponto de vista antropocêntrico, um patrimônio natural deve ser conservado para o futuro porque é valioso para o homem, seja por ser parte do sistema de suporte da vida, que conecta as pessoas a um território e ajuda a definir a identidade de um povo, seja pelo que pode contar ao homem em termos científicos, como ressaltado pelo *Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance*. O citado documento ressalta a importância de sítios que podem fornecer ao homem informações biológicas ou geológicas, ajudando as presentes e futuras gerações a entender melhor a natureza do mundo físico e como podemos viver dentro de seus meios (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002).

Fairchild, Teixeira e Babinski (2000) bem nos lembram que

É da natureza humana refletir sobre si e sobre o mundo ao seu redor. A consciência deu ao ser humano o domínio do tempo presente – penso, logo existo – mas também o desejo de saber sobre o seu passado e da origem do mundo para poder entender o seu lugar na Natureza e enfrentar o futuro. Todo povo, desde os tempos pré-históricos, guarda seus mitos e histórias sobre sua origem e a criação da Terra. Com o notável desenvolvimento das ciências nos últimos três séculos, a humanidade finalmente começou a desvendar, objetivamente, essas questões e os mistérios do mundo em que vive (p. 306).

Esse pensamento foi sintetizado na Declaração Internacional dos Direitos à Memória da Terra (Carta de Digne) - elaborada por geocientistas em 1991, por ocasião do I

In fact, adopting an anthropocentric point of view, a natural heritage site should be conserved for the future because it is valuable to man. That is either because it is part of the life support system, which connects people to a territory and helps define their identity, or because of what it can tell man in scientific terms, as highlighted by the Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance. This document highlights the importance of sites that can provide man with biological or geological information, helping present and future generations to have a better understanding of the nature of the physical world and how we can live within its environments (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002).

Fairchild, Teixeira and Babinski (2000) remind us that

It is human nature to reflect on ourselves and the world around us. Consciousness has given human beings mastery of the present - I think, therefore I am - but also the desire to know about their past and the origin of the world in order to understand their place in nature and face the future. Every population, since prehistoric times, has kept myths and stories about its origin and the creation of the Earth. With the remarkable development of the sciences over the last three centuries, humanity has finally begun to objectively unravel these questions and the mysteries of the world in which it lives (p. 306).

This way of thinking was summarized in the International Declaration of the Rights to the Memory of the Earth (Digne Charter) - drawn up by geoscientists in 1991 on the occasion of the First Inter-

Simpósio Internacional sobre Proteção do Patrimônio Geológico, realizado na cidade de Digne-les Bains - que salienta:

6 – Da mesma forma como uma velha árvore registra em seu tronco a memória de seu crescimento e de sua vida, assim também a Terra guarda a memória do seu passado... Uma memória gravada em níveis profundos ou superficiais. Nas rochas, nos fósseis e nas paisagens, a Terra preserva uma memória passível de ser lida e decifrada.

7 – Atualmente, o Homem sabe proteger sua memória: seu patrimônio cultural. O ser humano sempre se preocupou com a preservação da memória, do patrimônio cultural. Apenas agora começou a proteger seu patrimônio natural, o ambiente imediato. É chegado o tempo de aprender a proteger o passado da Terra e, por meio dessa proteção, aprender a conhecê-lo. Essa memória antecede a memória humana. É um novo patrimônio: o patrimônio geológico, um livro escrito muito antes de nosso aparecimento sobre o Planeta (CARTA DE DIGNE, 1991, p.1).

Isto é coerente com o disposto no preâmbulo da Carta de Burra, onde está consignado que os sítios com significado cultural enriquecem a vida das pessoas, podendo proporcionar um sentido de ligação da comunidade à paisagem e ao passado, dizendo-nos quem somos e qual foi o passado que nos formou, assim como se formou a paisagem (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a).

Ademais, de se notar que não existe no texto constitucional brasileiro qualquer menção à necessidade de que os bens que compõem o patrimônio cultural brasileiro sejam ou tenham sido objeto de apropriação humana enquanto uso. De fato, o legislador não ignorou que o uso cultural exigido pelo IPHAN pode mesmo

national Symposium on the Protection of Geological Heritage, held in the city of Digne-les Bains - which stresses:

6 - Just as an ancient tree retains the record of its life and growth, the Earth retains memories of the past inscribed both in its depths and on its surface, in the rocks and in the landscape, a record which can be read and translated.

7 - We have always been aware of the need to preserve our memories – our cultural heritage. Now the time has come to protect our natural heritage. The past of the Earth is no less important than that of Man. It is time for us to learn to protect this Earth heritage, and by doing so learn about the past of the Earth, to learn to read this 'book', the record in the rocks and the landscape, which was mostly written before our advent. (CARTA DE DIGNE, 1991, p.1).

This is consistent with the preamble to the Burra Charter, which states that sites of cultural significance enrich people's lives and can provide a sense of community connection to the landscape and the past, telling us who we are and what was the past that formed us, as well as the landscape (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a).

Furthermore, it should be noted that there is no mention in the Brazilian constitutional text of the need for the assets that make up Brazilian cultural heritage to be or have been the object of human appropriation. In fact, the legislator did not ignore the fact that the cultural use required by IPHAN may even be incompatible with the ecological and scientific values of a site. In this sense, Donato and

ser incompatível com os valores ecológicos e científicos de um sítio. Neste sentido, Donato e Ribeiro (2011), citando vasta bibliografia, alertam sobre o perigo de descaracterização do espaço subterrâneo em razão do uso humano:

As cavernas com seus componentes bióticos, biológicos e abióticos, os minerais são extremamente frágeis e interligados com o ambiente externo, portanto estão à mercê de alterações ambientais, essas alterações mesmo sendo pequenas podem representar grandes ameaças à integridade dos ecossistemas cavernícolas. (...)

A presença de visitantes e de iluminação modifica as condições ambientais no interior das cavernas, conduzindo às mudanças na umidade relativa do ar, temperatura do ar, concentração de CO₂, a proliferação de algas e diminuição de condições ideais para os troglófilos (espécies não exclusivamente cavernícolas, mas que possuem a capacidade de desenvolver todo seu ciclo de vida no meio subterrâneo, como algumas aranhas, crustáceos e insetos) e troglóbios (espécies restritas às cavernas, não sendo encontradas em ambientes externos) viverem. Esses processos produzem uma deterioração progressiva na qualidade ambiental e favorecem a degradação de espeleotemas, arte rupestre e biodiversidade de troglóbios (FERNÁNDEZ-CORTES *et al.* 1986; ANDRIEUX 1988; CIGNA 1993; MANGIN; D'HULST 1996; BAKER, GENTY, SMART 1998; SÁNCHEZ-MORAL *et al.*, 1999 apud CALAFORRA *et al.*, 2003) (DONATO; RIBEIRO, 2011, p. 245).

A não-vinculação da patrimonialização ao uso cultural está respaldada na Carta de Burra (ICOMOS AUSTRÁLIA, 2013a, artigo 7.2) - que destaca que uso de um sítio cultural deve ser compatível com a retenção do seu significado

Ribeiro (2011), citing a vast bibliography, warn of the danger of de-characterization of the underground space due to human use:

Caves, with their biotic, biological and abiotic components, minerals, are extremely fragile and interconnected with the external environment, so they are at the mercy of environmental changes, and these changes, even if they are small, can represent major threats to the integrity of cave ecosystems. (...)

*The presence of visitors and lighting modifies the environmental conditions inside caves, leading to changes in relative humidity, air temperature, CO₂ concentration, the proliferation of algae and a decrease in the ideal conditions for troglófilos (species that are not exclusively cave-dwelling, but have the ability to develop their entire life cycle underground, such as some spiders, crustaceans and insects) and troglóbios (species restricted to caves and not found in external environments) to live. These processes produce a progressive deterioration in environmental quality and favor the degradation of speleothems, rock art and troglóbic biodiversity (FERNÁNDEZ-CORTES *et al.* 1986; ANDRIEUX 1988; CIGNA 1993; MANGIN; D'HULST 1996; BAKER, GENTY, SMART 1998; SÁNCHEZ-MORAL *et al.*, 1999 apud CALAFORRA *et al.*, 2003) (DONATO; RIBEIRO, 2011, p. 245).*

The Burra Charter (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a, article 7. 2) which emphasizes that the use of a cultural site must be compatible with the retention of its cultural significance and respectful of the relevant values supports the non-binding of

cultural e respeitoso com os valores relevantes -, assim como na *Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance* (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002, artigo 2º) - que ressalta que a conservação se baseia na análise do significado natural do sítio e objetiva justamente a manter, restaurar ou reestabelecer esse significado.

Das diversas concepções inseridas na definição de patrimônio, a partir da Constituição de 1988, Ulpiano Bezerra de Meneses destaca a ideia de que os valores culturais (os valores, em geral) não são criados pelo Estado, mas pelos grupos formadores da sociedade brasileira. O poder público pode participar da criação desses valores, privilegiando ou marginalizando uns e outros, mas sempre no jogo das práticas sociais; mas seu papel é declaratório e lhe compete, sobretudo, proteção, em colaboração com o produtor de valor, ou seja, a comunidade. Entretanto, mesmo sem qualquer intervenção do poder público, existe o patrimônio cultural (MENESES, 2012, p. 33).

Neste sentido, o IPHAN foi criado justamente para promover, em todo o país e de modo permanente, o tombamento, a conservação, o enriquecimento e o conhecimento do patrimônio cultural nacional, este entendido na acepção do artigo 216 da Constituição (BRASIL, 1937a; BRASIL, 1937b), não lhe sendo lícito diminuir a abrangência do texto constitucional ou ignorar o valor atribuído ao bem pela comunidade.

Ao prever, fundamentado na Portaria 375/2018, que só teria relevância cultural os sítios paleontológicos e espeleológicos submetidos à apropriação humana, o IPHAN excluiu de plano a relevância cultural de todos os sítios naturais que não

heritage to cultural use. Additionally, the Australian Natural Heritage Charter for the Conservation of Places of Natural Heritage Significance (CAIRNES; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN, 2002, article 2) emphasizes that conservation is based on the analysis of the natural significance of the site and aims precisely to maintain, restore or re-establish this significance.

Of the various concepts included in the definition of heritage since the 1988 Constitution, Ulpiano Bezerra de Meneses highlights the idea that cultural values (values in general) are not created by the state, but by the groups that make up Brazilian society. The government can participate in the creation of these values, privileging or marginalizing one or the other, but always in the play of social practices. Nevertheless, it has a declaratory role and it is above all responsible for its protection, in collaboration with the the community that produces the value. However, even without any intervention by the public authorities, cultural heritage exists (MENESES, 2012, p. 33).

Therefore, IPHAN was created precisely to promote throughout the country and on a permanent basis, the listing, conservation, enrichment and knowledge of the national cultural heritage, this being understood in the sense of the Constitution article 216 (BRASIL, 1937a; BRASIL, 1937b). Thus, it is not allowed to diminish the scope of the constitutional text or ignore the value attributed by the community to the asset.

By stating, based on Ordinance 375/2018, that only paleontological and speleological sites subject to human appropriation would have cultural relevance, IPHAN has promptly excluded the cultural relevance of all natural sites that do not have cultural uses but do have scientific, paleontological or ecological value. Considering that the

tenham usos culturais, mas que tenham valor científico, paleontológico ou ecológico. Considerando que a significância ou relevância cultural de um bem pode estar relacionada a outros valores, também previstos constitucionalmente, que podem inclusive ser incompatíveis com usos culturais, o entendimento esposado com base na Política Nacional de Patrimônio Material da autarquia federal é inconstitucional.

Consigne-se, por fim, que é falacioso o argumento de que, sem apropriação humana, não poderia haver valoração de mérito ambiental vez que, ao se tornar objeto da ação e conhecimento pelo homem, um bem natural já é por ele apropriado. No caso, a Paleotoca foi conhecida e apropriada tanto por cientistas quanto pela sociedade civil organizada em ONGs, que defenderam a conservação do bem.

Cabimento do instituto do tombamento

Reconhecer o valor patrimonial de um sítio objetiva não apenas aumentar o conhecimento sobre o local, mas também protegê-los das forças de destruição políticas e/ou de mercado, dotando-os assim de um certo direito à sobrevivência sobre outros elementos do ambiente.

Enquanto patrimônio cultural, os sítios espeleológicos e paleontológicos são passíveis de promoção e proteção pelo Poder Público, por meio de inventários, registros, vigilância, tombamento e desapropriação, e de outras formas de acautelamento e preservação (BRASIL, 1988).

O Decreto-lei nº 25/37, que dispõe sobre o instituto do tombamento, embora traga uma visão tradicional de patrimônio, valorizando, sobretudo, bens móveis e imóveis a que fosse atribuída

cultural significance or relevance of an asset can be related to other values, also provided for in the constitution, which can even be incompatible with cultural uses, the position adopted on the basis of the federal authority's National Material Heritage Policy is unconstitutional.

Finally, it should be noted that the argument that without human appropriation there could be no valuation of environmental merit is fallacious, since when a natural asset becomes the object of action and knowledge by man, he already appropriates it. In this case, the Paleoburrow was known and appropriated both by scientists and by civil society organized in NGOs, which defended the conservation of the asset.

The appropriateness of heritage listing

Recognizing the heritage value of a site aims not only to increase knowledge about the place, but also to protect them from political and/or market forces of destruction, thus endowing them with a certain survival right over other elements of the environment.

As cultural heritage, speleological and paleontological sites are subject to protection by the Public Authorities, through inventories, registers, surveillance, listing, expropriation and other forms of protection and preservation (BRASIL, 1988).

Decree-Law 25/37, which institutes the instrument of listing, takes a traditional view of heritage, valuing, above all, movable and immovable asset to which notable artistic, historical and architectural importance has been attributed. Neverthe-

notável relevância artística, histórica e arquitetônica, prevê também que são sujeitos a tombamento “os monumentos naturais, bem como os sítios e paisagens que importe conservar e proteger pela feição notável com que tenham sido dotados pela natureza ou agenciados pela indústria humana” (BRASIL, 1937, artigo 1º). Patente, portanto, especialmente considerando a necessária releitura constitucional do decreto, que o instituto do tombamento é aplicável a bens materiais naturais. Sobre o cabimento do instituto do tombamento para cavidades naturais, tem-se vasta doutrina, a exemplo de Oliveira *et al.* (2007), Oliveira e Correa (2019). Este foi o entendimento adotado pelo IPHAN em diversos outros casos, quando houve tombamento de patrimônio espeleológico ou paleontológico, a exemplo das grutas do Lago Azul e Nossa Senhora da Aparecida, em Bonito/MS (LOBO; BOGGIANI, 2013). A mudança de entendimento pela autarquia não tem respaldo em qualquer norma constitucional ou infraconstitucional, sendo certo que mera portaria não poderia inovar a ordem jurídica.

MARCHESAN *et al.* (2020) ressaltam que, quando se objetiva o tombamento de um bem, a primeira medida adotada é analisar se o bem possui elementos que o distinguem, que o tornam merecedor de ser protegido por tal instrumento. Neste processo, os valores são ponderados, a fim de verificar se estão presentes no bem que se pretende proteger. Ao se verificar, preliminarmente, que o bem é dotado de valores, o processo de tombamento deve, necessariamente, ser instruído por um dossiê que detalha a particularidade daquele objeto, a sua significância para a coletividade, através de análises técnicas e documentos que fundamentam, justi-

less, it also states that “natural monuments, as well as sites and landscapes which are important to conserve and protect because of the remarkable feature with which they have been endowed by nature or brought about by human industry” are also subject to listing (BRASIL, 1937, article 1). Therefore, especially considering the necessary constitutional re-reading of the decree, it is clear that the listing is applicable to natural assets. There is a vast body of doctrine on the appropriateness of the heritage listing for natural caves, such as Oliveira et al. (2007), Oliveira and Correa (2019). This was the understanding adopted by IPHAN in several other cases, when speleological or paleontological heritage was listed, such as the Lago Azul and Nossa Senhora da Aparecida caves, in Bonito/MS (LOBO; BOGGIANI, 2013). The municipality’s change of understanding is not supported by any constitutional or infra-constitutional rule, and it is certain that a mere ordinance could not innovate the legal order.

MARCHESAN et al. (2020) pointed out that when an asset is to be listed, the first step is to analyze whether the asset has elements that distinguish it, which make it worthy of protection by such an instrument. In this process, values are evaluated to see if they are present in the asset that is to be protected. Once it has been preliminarily verified that the asset possesses such values, the listing process must necessarily be instructed by a dossier detailing the particularity of the object, its significance for the community, through technical analyses and documents that substantiate, justify and legalize the recognition of the protection of the material asset.

In this case, once the cultural significance of the site has been demonstrated, IPHAN would

ficam e legalizam o reconhecimento da proteção do bem material.

No caso em análise, demonstrada, de plano, a significância cultural do sítio, ao IPHAN caberia instaurar o processo de tombamento, analisando concretamente o caso, realizando, por fim, a tutela deste patrimônio.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Às cavernas e sítios paleontológicos podem ser atribuídos diversos tipos de valores, que lhes concedem relevância cultural, qualificando-os como patrimônio natural e cultural. Inexiste hierarquia entre os valores que podem ser atribuídos a um bem, devendo todos ser analisados e sopesados no caso concreto (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a).

Ao prever, com base na Portaria 375/2018, que o sítio paleontológico e espeleológico só teria relevância cultural se submetido a apropriação humana, o IPHAN excluiu a relevância cultural do bem natural que não tem uso cultural. Considerando que a significância ou relevância cultural pode estar relacionada a outros valores, também previstos constitucionalmente, e que os usos culturais podem ser incompatíveis com esses valores, o entendimento conferido à Política Nacional de Patrimônio Material pela autarquia federal em Minas Gerais é inconstitucional.

No caso da Paleotoca Serra do Gandarela, os estudos levados ao processo administrativo de tombamento demonstraram que a caverna possui gênese rara, o que demonstra seus valores histórico/evolucionário, científico e de informação, conhecimento e educação. O fato de ser hospedagem de exemplares únicos da fauna brasileira (troglóbio raro), demonstra

be responsible for initiating the listing process, analyzing the case concretely and ultimately protecting this heritage.

FINAL CONSIDERATIONS

Caves and paleontological sites can be assigned different types of values, which give them cultural relevance, qualifying them as natural and cultural heritage. There is no hierarchy between the values that can be attributed to an asset, all of which must be analyzed and weighed up in the specific case (ICOMOS AUSTRALIA, 2013a).

By determining based on Ordinance 375/2018, that the paleontological and speleological site would only have cultural relevance if subjected to human appropriation, IPHAN excluded the cultural relevance of the natural asset that has no cultural use. Considering that cultural significance or relevance can be related to other values, also provided by the Constitution, and that cultural uses can be incompatible with these values, the understanding given to the National Material Heritage Policy by the federal authority in Minas Gerais is unconstitutional.

In the case of the Serra do Gandarela Paleoburrow, the studies carried out as part of the listing process showed that the cave has a rare genesis, which demonstrates its historical/evolutionary, scientific and information, knowledge and education values. The fact that it is home to unique specimens of Brazilian fauna (rare troglóbites) demonstrates its ecological sustainability values; life support values; biodiversity values

seus valores de sustentabilidade ecológica; de suporte para a vida; de biodiversidade (valorização da preservação da biodiversidade expressa em variedade e raridade de espécies). Inegável ainda seu valor intrínseco, de existência e de legado. Atendo-nos aos valores elencados expressamente no art. 216 da Constituição Federal, identifica-se os valores paleontológico, científico e ecológico; todos esses valores apontam para a significância cultural concreta do sítio. Tratando-se de bem portador de significância cultural, componente do patrimônio cultural brasileiro, a Paleotoca Serra do Gandarela pode ser objeto de tombamento, nos termos previstos no Decreto-Lei 25/37.

O Iphan, em sua constante reflexão sobre o desempenho do papel que lhe é solicitado pela sociedade brasileira, deveria tentar ampliar seu escopo de atuação e, conseqüentemente, o estoque patrimonial do país, e não o limitar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao MPMG pela oportunidade de trabalhar com questões tão relevantes; à UFMG por prover conhecimentos acadêmicos de qualidade e à SBE por continuar a me desafiar o aperfeiçoamento.

(valuing the preservation of biodiversity expressed in the variety and rarity of species). Its intrinsic value, existence and legacy are also undeniable. Looking at the values expressly listed in art. 216 of the Federal Constitution, the paleontological, scientific and ecological values are identified; all these values point to the concrete cultural significance of the site. Since it is an asset of cultural significance and a component of Brazil's cultural heritage, the Serra do Gandarela Paleoburrow can be the subject of listing under the terms of Decree-Law 25/37.

IPHAN, in its constant reflection on the role it is being asked to play by Brazilian society, should try to broaden its scope of action and, consequently, the country's heritage stock, not limit it.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank the MPMG for the opportunity to work on such relevant issues; UFMG for providing quality academic knowledge and the SBE for continuing to challenge me to improve.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ASSIS, D. A.; CASTRO, P. T. A. Modelagem espacial dos locais de ocorrência de paleotocas nas serras do Gandarela e do Curral, Quadrilátero Ferrífero - MG. *Geociências*, São Paulo, UNESP, v. 41, n. 3, p. 569-582, 2022.

ASHWORTH, G. J. From History to Heritage: From Heritage to Identity. In: ASHWORTH, G. J.; Larkham, P. J. *Building a New Heritage: Tourism, Culture and Identity in the New Europe*. London: Routledge, 1994. p. 13-30.

AVRAMI, E. C.; MASON, R.; DE LA TORRE, M. *Values and Heritage Conservation: Research Report*. Los Angeles/ CA: The Getty Conservation Institute, 2000. Disponível em: <http://hdl.handle.net>. Acesso: 1 jun. 2022. 96 p.

BITTENCOURT, J; GOMIDE, A.; CARMO, F.; BUCHMANN, F.S. Registro paleontológico em caverna desenvolvida em formações ferríferas na Serra do Gandarela. In: RUCHKYS, U.A.; TRAVASSOS, L.E.P; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (org). *Patrimônio espeleológico em formações ferruginosas: Propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. São Paulo: SBE, 2015. P. 192-209.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Decreto-lei nº 25*, de 30 de novembro de 1937a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Decreto nº 9.238*, de 15 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Decreto Federal nº 10.935*, de 12 de janeiro de 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Lei nº 378*, de 13 de janeiro de 1937b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BRASIL. CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. *Resolução nº 4, de 18 de junho de 1987*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso: 7 fev. 2022.

BUCHMANN, F. S. C.; CARMO, F.F.; CARMOS, F.F.; JACOBI, C.M.; SANDIM, V.M.; FRANK, H.T. Paleotocas Desenvolvidas em Rochas Ferríferas: Importante Registro da Megafauna no Norte de Minas Gerais. In: CARMO, F.F.; KAMINO, L.H.Y. (org). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais*. Belo Horizonte: 3i editora, 2015. P. 149-167.

BUCHMANN, F.S.C.; LOPES, R. P.; CARON, F. Paleotoca do Município de Cristal, RS - Registro da atividade fossorial de mamíferos gigantes extintos no sul do Brasil. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS,

C.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S.; BERBERT-BORN, M.; SALUN FILHO, W.; QUEIROZ, E.T. (Eds.) 2013. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: CPRM, 2013. v. 3. p. il. Disponível em: <http://www.unb.br>. Acesso: 3 set. 2022.

CAIRNES, Lorraine; AUSTRALIAN HERITAGE COMMISSION; AUSTRALIAN COMMITTEE FOR IUCN. Australian Natural Heritage Charter: for the conservation of places of natural heritage significance. Canberra: Australian Heritage Commission, 2002. 26P. Disponível em: <<http://www.ahc.gov.au/publications/anhc/>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

CARTA DE DIGNE. Declaração Internacional dos Direitos à Memória da Terra. In: *1º Simpósio Internacional Sobre a Proteção do Patrimônio Geológico*, 1991, Digne-Les-Bains. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br>. Acesso: 12 jan. 2016.

CARMO, F.F.; CARMO, F.F.; BUCHMANN, F.S.; FRANK, H.T.; JACOBI, C.M. Primeiros Registros de Paleotocas Desenvolvidas em Formações Ferríferas, Minas Gerais, Brasil. In: *ANAIS do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia*. Ponta Grossa-PR, 21-24 de julho de 2011 – Sociedade Brasileira de Espeleologia. P. 531-540.

DE LA TORRE, M. *Assessing the Values of Cultural Heritage*: Research Report. Los Angeles/ CA: The Getty Conservation Institute, 2002. 119p.

DONATO, C. R.; RIBEIRO, A. S. Caracterização dos Impactos Ambientais de Cavernas do Município de Laranjeiras, Sergipe. *Caminhos de Geografia Uberlândia*, v. 12, n. 40, dez/2011. p. 243-255.

DUTRA, G. M. Análise de susceptibilidade de duas cavidades em litologia de ferro na Serra do Gandarela, MG. Estudo de caso: AP_0009 e AP_0038. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

FAIRCHILD, T.R.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. Em Busca do Passado do Planeta: Tempo Geológico. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. (Org). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. P. 305-326.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES (ICOMOS). *Yatra aur Tammanah*. Learnings & Commitments from the Culture-Nature Journey, 19th ICOMOS General Assembly, Delhi, 2017. Disponível em: <https://www.icomos.org>. Acesso: 13 jun. 2022.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES AUSTRALIA (ICOMOS AUSTRÁLIA). *Charter for Places of Cultural Significance*, The Burra Charter. 2013a. Disponível em: <http://australia.icomos.org>. Acesso: 08 jun. 2022.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES AUSTRALIA (ICOMOS AUSTRÁLIA). *Understanding and assessing cultural significance*: Practice Note. 2013b. Disponível em: <https://australia.icomos.org>. Acesso: 8 jun.2022.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). *Portaria nº 92*, de 5 de julho de 2012. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br>. Acesso: 3 de jun. 2022.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). *Portaria nº 375*, de 19 de setembro de 2018. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br>. Acesso: 3 de jun. 2022.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). *World Heritage at the IUCN world Parks Congress: The promise of Sydney*. Gland, Switzerland: IUCN, 2015. Disponível em: <https://whc.unesco.org>. Acesso: 3 de jun. 2022.

LARSEN, Peter Bille Universidad; WIJESURIYA, Gamini. Interrelaciones entre naturaleza y cultura en el Patrimonio Mundial: Últimas tendencias. *Rev. Patrimônio Mundial*, n. 75, 2015.

LOBO, H.A.S.; BOGGIANI, P.C. Cavernas como patrimônio geológico. *Boletim Paranaense de Geociências*, v.70, dez.2013. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br>. Acesso: 13 jul. 2022. P.190-199.

MALLARACH, J. M.; VERSCHUUREN, B. Changing Concepts and Values in Natural Heritage Conservation: A View through IUCN and UNESCO Policies. In: AVRAMI, E. *et al. Values in Heritage Management Emerging Approaches and Research Directions*. Los Angeles/ CA: The Getty Conservation Institute, 2019. P. 141-157.

MARCHESAN, A.M.M.; OLIVEIRA, G.R.; MIRANDA, M.P.S.; FLACH, M.S.; CUREAU, S. Comentários sobre o projeto de Lei n. 2396-2020: alterações injustificáveis no instituto do tombamento. *Revista do Ministério Público do RS*, n. 89, jan-jun. 2021. Porto Alegre. P. 281-306.

MASON, R. Assessing Values in Conservation Planning: Methodological Issues and Choices. In: DE LA TORRE, M. *Assessing the Values of Cultural Heritage: Research Report*. Los Angeles/ CA: The Getty Conservation Institute, 2002. P.5-30.

MCILROY, D. The application of technology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis: Introduction. *Geological Society Special Publications*, v. 228, p1-2, 2004.

MINAS GERAIS. 1ª Vara Cível e Criminal da Comarca de Caeté. Processo 5000835-90.2021.8.13.004. Ação Civil Pública. Ministério Público de Minas Gerais versus Município de Caeté e Vale S.A. 2021. Disponível em: www.tjmg.jus.br. Acesso: 9 set. 2022.

MENESES, U. T. B. O campo do Patrimônio Cultural: uma revisão de premissas. In: IPHAN. *I Fórum Nacional do Patrimônio Cultural (Anais)*. Ouro Preto, 2009. Brasília: Iphan, 2012. P.25-39.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA (UNESCO). *Orientações Técnicas para Aplicação da Convenção do Patrimônio Mundial*. WHC/21/44.COM/12. Edição em português/versão 2021. Lisboa, janeiro de 2022. Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/guidelines/>. Acesso: 21 jun.2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). *Convenção para a proteção do patrimônio mundial, natural e cultural*. Paris, 1972. Disponível em: <http://whc.unesco.org/archive/convention-pt.pdf>. Acesso: 26 jun. 2022.

OLIVEIRA, I.P.M.R.; CORREA, D. Instrumentos de proteção ao patrimônio espeleológico de Minas Gerais. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 35, 2019. Bonito. Anais. Campinas: SBE, 2019. p.253-262. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br> Acesso: 1 set. 2022.

OLIVEIRA, I.P.M.R.; MENDES, B.A.; FIGUEIREDO, P; BUENO, A.P. Tombamento municipal como instrumento de proteção de cavidades naturais subterrâneas: sítio natural Gruta Pau-Ferro, Monjolos – Minas Gerais. In: *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 29, 2007. Ouro Preto. Anais. Campinas: SBE, 2007. p. 211-219. Disponível em: <https://www.cavernas.org.br>. Acesso: 1 set. 2022.

PILÓ, L.B; AULER, A.S. Introdução à Espeleologia. In: INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. *Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. CRUZ, J.B.; PILÓ, L.B. (org). Brasília: ICMBio, 2019. 259 p.

POSEY, D. A. *Cultural and Spiritual Values of Biodiversity*. United Nations Environment Programme. Intermediate Technology Publications: London, 1999. 731p.

RÖSSLER, M. Paisagens Culturais do Patrimônio Mundial: Uma Perspectiva Global. In: BROWN, N. M.; BERESFORD, M. *The Protected Landscape Approach: Linking Nature, Culture and Community*. Gland, Suíça, e Cambridge, Reino Unido: IUCN, 2005. P. 37-46.

RUCHKYS, U.A.; BITTENCOURT, J.S.; BUCHMANN, F.S.C. A paleotoca da Serra do Gandarela e seu potencial como geossítio do Geoparque Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Caderno de Geografia*, v.24, n.42, P. 249-263, 2014.

RUCHKYS, U.; PEREIRA, E.; PEREIRA, M. Áreas Prioritárias para Geoconservação do Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas do Quadrilátero Ferrífero. In: RUCHKYS, U.A.; TRAVASSOS, L.E.P; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (org). *Patrimônio espeleológico em formações ferruginosas: Propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero*, Minas Gerais. São Paulo: SBE, 2015. P. 288- 315.

SCIFONI, Simone. *A Construção do Patrimônio Natural*. São Paulo: FFLCH, 2008. 199p.

VERSCHUUREN, B.; MALLARACH, J-M.; BERNBAUM, E.; SPOON, J.; BROWN, S.; BORDE, R.; BROWN, J.; CALAMIA; M.; MITCHELL, N.; INFIELD, M; LEE, E. *Cultural and Spiritual Significance of Nature*. Guidance for protected and conserved area governance and management. Best Practice Protected Area Guidelines Series. No. 32. Gland/Switzerland: IUCN, 2021. 88p.

SATTERFIELD, T. Numbness and Sensitivity in the Elicitation of Environmental Values. In: DE LA TORRE, M. *Assessing the Values of Cultural Heritage*: Research report. Los Angeles/ CA: The Getty Conservation Institute, 2002. P.77-100.

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E HIDRODINÂMICA DO SISTEMA CÁRSTICO DA GRUTA ÉDEN, PAINS – MG

HYDRODYNAMICS AND INTRINSIC VULNERABILITY OF THE ÉDEN CAVE KARST SYSTEM, PAINS - MG

Pedro Henrique da Silva Assunção

Universidade Federal de Minas Gerais Sociedade
Excursionista e Espeleológica - SEE
Espeleogrupo Pains - EPA
E-mail: pedroassuncao94@hotmail.com

Paulo Henrique Ferreira Galvão

Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: hidropaulo@gmail.com

Thiago Nogueira Lucon

Universidade Federal de Ouro Preto Sociedade
Excursionista e Espeleológica – SEE
E-mail: thiago.n.lucon@gmail.com

Peter Marshall Fleming

Centro de Desenvolvimento da
Tecnologia Nuclear - CDTN
E-mail: pmf@cdtn.br

Bruno Doi

Universidade de São Paulo

Tássia Marques

Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO

Os aquíferos cársticos são naturalmente mais vulneráveis à contaminação do que os demais tipos de aquífero, além de serem constituídos por complexas redes de condutos e sistemas de cavernas, cujo fluxo subterrâneo pode ser turbulento, onde as águas superficial e meteórica podem ser rapidamente transferidas para a zona freática. Essas características heterogê-

ABSTRACT

Karst aquifers are naturally more vulnerable to contamination than other types of aquifer. They are made up of complex conduits and cave systems networks, where surface and meteoric water can be rapidly transferred to the phreatic zone where underground flow can be turbulent. These heterogeneous and anisotropic characteristics makes it difficult to determine the karst network and

neas e anisotrópicas resultam em dificuldades na determinação da rede cárstica e direções de fluxo, sendo necessário associar métodos específicos de hidrogeologia cárstica. Este artigo busca mapear as zonas de vulnerabilidade intrínseca do sistema cárstico da Gruta Éden (maior caverna da região) da bacia do rio São Miguel, MG, além de compreender suas variações espacial e sazonal dos parâmetros de fluxo (velocidade média e dispersão longitudinal), e seus mecanismos de recarga e descarga. Assim, foi adaptado o método EPIK para mapear as zonas de vulnerabilidade do sistema associando com testes de traçadores (fluoresceína sódica) durante as estações seca e chuvosa, e analisadas as curvas de restituição dos traçadores para obter os parâmetros de fluxo. Os resultados mostram que o fluxo é controlado por dobras formando janelas cársticas e por fraturas/falhas subverticais com direções NW-SE e N-S. A recarga demonstrou ser difusa em locais com maiores espessuras de solos e concentrada em dolinas, sumidouros e maciços rochosos; as zonas de descargas estão próximas às margens do rio São Miguel, que é o nível de base local. As curvas de restituição dos traçadores mostraram que este sistema é sensível às variações sazonais e apontaram a existência de heterogeneidades, que controlam a variação dos parâmetros de fluxo. As zonas de maiores vulnerabilidades estão relacionadas às áreas sem cobertura protetora com recarga concentrada (autogênica) e às maiores velocidades de fluxo. A associação de diferentes técnicas mostrou-se eficaz para entender o comportamento hidrodinâmico e sua relação com a vulnerabilidade do sistema cárstico.

PALAVRAS-CHAVE: hidrogeologia cárstica, Traçador fluorescente, Vulnerabilidade Intrínseca, Sistema cárstico.

flow directions, being necessary to apply specific karst hydrogeology methods. This article aims to map the intrinsic vulnerability zones of the Éden Cave karst system (the largest cave in the region) in the São Miguel river watershed, MG, as well as understanding its spatial and seasonal variations in flow parameters (mean velocity and longitudinal dispersion), and its recharge and discharge mechanisms. Therefore, the EPIK method was adapted to map the system's vulnerability zones, associated with tracer tests (sodium fluorescein) during the dry and rainy seasons, and the breakthrough tracer curves were analyzed to obtain the flow parameters. The results show that the flow is controlled by folds forming karst windows and by subvertical fractures/faults in NW-SE and N-S directions. Recharge proved to be diffuse in places with thicker soils and concentrated in dolines, sinkholes and rock masses; the discharge zones are close to the São Miguel riverbanks, which is the local base level. The breakthrough tracer curves showed that this system is sensitive to seasonal variations and pointed to the existence of heterogeneities, which control the variation of the flow parameters. The greatest vulnerability zones are related to areas without protective cover with concentrated recharge (autogenic) and the highest flow velocities. The combination of different techniques proved to be effective in understanding the hydrodynamic behavior and its relationship with the vulnerability of the karst system.

KEYWORDS: Karst hydrogeology, Fluorescent tracer, Intrinsic vulnerability, Karst system.

INTRODUÇÃO

Os sistemas cársticos se desenvolvem pela dissolução de rochas solúveis, promovendo a espeleogênese, formando redes complexas de condutos e cavernas. Esse processo cria espaços vazios (porosidade terciária), onde a água é transmitida e armazenada, dando origem aos aquíferos cársticos. A rede cárstica pode passar por mudanças ao longo do tempo, como colapsos de cavernas, preenchimento de condutos por sedimentos, ter oscilações internas da superfície freática, além de surgências que podem ser reativadas durante condições chuvosas. Essas mudanças conferem, ao aquífero cárstico, alta variabilidade temporal e espacial dos parâmetros hidráulicos (velocidade de fluxo, dispersão e condutividade hidráulica). A variabilidade sazonal depende das condições climáticas e hidrológicas, que podem alterar a hidrodinâmica da rede cárstica em um curto intervalo de tempo. Por isso, esse tipo de aquífero é considerado heterogêneo e anisotrópico, dificultando o entendimento da circulação da água subterrânea e, sobretudo, altamente vulnerável à contaminação antrópica (White, 2003; Ford & Willians, 2007; Palmer, 2007; Goldscheider & Drew, 2007; Worthington & Ford, 2009; Klimchouk, 2015).

Os aquíferos cársticos naturalmente possuem uma maior vulnerabilidade à contaminação do que os demais tipos de aquífero, onde o fluxo rápido e turbulento não permitindo que haja tempo suficiente para possíveis atenuações de contaminantes (Gutiérrez *et al.*, 2014). As águas superficiais são rapidamente transferidas para o sistema subterrâneo conferindo-lhe uma recarga rápida, por meio de feições cársticas, como dolinas e sumidouros, podendo ser possí-

INTRODUCTION

Karst systems develop through the dissolution of soluble rocks, promoting speleogenesis and forming complex networks of conduits and caves. This process creates empty spaces (tertiary porosity) where water is transmitted and stored, giving rise to karst aquifers. The karst network can undergo changes over time, such as the collapse of caves, the filling in of conduits by sediments, internal oscillations in the phreatic surface, and springs that can be reactivated during rainy conditions. These changes give karst aquifers high temporal and spatial variability in hydraulic parameters (flow velocity, dispersion and hydraulic conductivity). Seasonal variability depends on climatic and hydrological conditions, which can alter the hydrodynamics of the karst network over a short period of time. For this reason, this type of aquifer is considered heterogeneous and anisotropic, making it difficult to understand groundwater circulation and, above all, highly vulnerable to anthropogenic contamination (White, 2003; Ford & Willians, 2007; Palmer, 2007; Goldscheider & Drew, 2007; Worthington & Ford, 2009; Klimchouk, 2015).

*Karst aquifers have a greater natural vulnerability to contamination than other types of aquifers, where rapid and turbulent flow does not allow sufficient time for possible attenuation of contaminants (Gutiérrez *et al.*, 2014). Surface water is quickly transferred to the underground system, giving it rapid recharge, through karst features such as dolines and sinkholes, which can be possible routes for contaminants entry. Piló (1999) and Ferreira (2019) point to common environmental problems in Brazilian karst regions, such as water contamination, changes in water dynamics, deforestation, farming, mineral extraction, urbanization and industrialization. One way of protecting ground-*

veis rotas de entrada do contaminante. Piló (1999) e Ferreira (2019) atentam para problemas ambientais comuns em regiões cársticas no Brasil, como contaminação da água, alterações da dinâmica hídrica, desmatamento, agropecuária, extração mineral, urbanização e industrialização. Uma das maneiras de proteção dos recursos hídricos subterrâneos em carste se dá mediante ao mapeamento das zonas de vulnerabilidade e de recarga, utilizando métodos desenvolvidos especificamente para aquíferos cársticos (Stevanović, 2015; Younos et al., 2018).

A vulnerabilidade intrínseca à contaminação de um aquífero pode ser definida como a sensibilidade do aquífero quando este é submetido a uma determinada carga de contaminante, que é influenciada pela capacidade natural de atenuação à contaminação. Por outro lado, o risco de poluição pode ser considerado como a interação das características dessa vulnerabilidade intrínseca com a carga de contaminante de origem antrópica (Foster et al., 2002). O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998) trata-se de uma análise multicritério ou paramétrica baseada em SIG (Sistemas de Informação Geográfica) que propõe o mapeamento do índice de vulnerabilidade intrínseca de águas subterrâneas em regiões cársticas. Além disso, são definidas zonas de proteção (S) para as classes estabelecidas pelo Fator de Proteção (F) no mapa de vulnerabilidade. Marín et al. (2015) fazem uma proposta semelhante em que se define recomendações para gestão das áreas de proteção ambiental, que podem ser adaptadas de acordo com a realidade de cada país. No Brasil, o método EPIK foi aplicado em estudos realizados em uma porção da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas (Ribeiro, 2016), no Parque Estadual do Intervalos em São Paulos (Lenhare, 2014), na

water resources in karst is by mapping vulnerability and recharge zones, using specific methods developed for karst aquifers (Stevanović, 2015; Younos et al., 2018).

An aquifer intrinsic vulnerability to contamination can be defined as the aquifer sensitivity when it is subjected to a certain contaminant load, which is influenced by the natural capacity to mitigate contamination. On the other hand, the risk of pollution can be considered as the interaction between the characteristics of this intrinsic vulnerability and the contaminant load of anthropogenic origin (Foster et al., 2002). The EPIK method (Doerfliger & Zwahlen, 1998) is a multi-criteria or parametric analysis based on GIS (Geographic Information Systems) that proposes mapping the intrinsic vulnerability index of groundwater in karst regions. In addition, protection zones (S) are defined for the classes established by the Protection Factor (F) on the vulnerability map. Marín et al. (2015) make a similar proposal in which they define recommendations for the management of environmental protection areas, which can be adapted according to the reality of each country. In Brazil, the EPIK method has been applied in studies carried out in a portion of the Sergipe-Alagoas Sedimentary Basin (Ribeiro, 2016), the Intervalos State Park in São Paulo (Lenhare, 2014), the Salitre River Basin in Bahia (Melo, 2017) and the São Miguel river watershed (Pereira et al., 2019). On a regional scale, Pereira et al. (2019) proposed an adaptation of the EPIK considering the reality of a Brazilian karst region. For this article, an intrinsic vulnerability assessment was adopted based on the adaptation of the EPIK method proposed by Pereira et al. (2019), according to the contexts of the São Miguel River basin and the Neoproterozoic karst aquifer.

Bacia Hidrográfica do Rio Salitre na Bahia (Melo, 2017) e na bacia do Rio São Miguel (Pereira *et al.*, 2019). Na escala regional, Pereira *et al.* (2019) propõe uma adaptação do EPIK considerando a realidade de uma região cárstica brasileira. Para este artigo, adotou-se avaliação de vulnerabilidade intrínseca a partir da adaptação do método EPIK, proposta por Pereira *et al.* (2019), de acordo com os contextos da bacia do rio São Miguel e do aquífero cárstico neoproterozoico.

A técnica de traçadores corantes fluorescentes é uma excelente ferramenta na delimitação das áreas de contribuição hídrica de surgências cársticas, na estimativa de velocidade do fluxo e tempo de trânsito, e na determinação de áreas de recargas e descarga. Os corantes são substâncias orgânicas sintéticas que possuem propriedade de fluorescência, normalmente são ausentes nas águas naturais, seguros à saúde humana e altamente detectáveis, o que os tornam muito eficazes. A fluoresceína sódica (uranina) e rodamina WT são considerados os principais traçadores conservativos utilizados em áreas cársticas. Ao depender do objetivo e da abordagem aplicada no estudo, as análises dos resultados podem ser tanto qualitativas quanto quantitativas (Field, 2002; Smart, 2005; Benischke *et al.*, 2007; Leibundgut *et al.*, 2009; Benischke, 2021). As análises quantitativas são baseadas nas curvas de restituição de traçadores conservativos, *breakthrough tracer curves* (BTCs), e nos princípios de transporte de solutos (advecção e dispersão), em que é possível obter dados (velocidades de fluxo e coeficiente de dispersão) sobre processos de transporte do fluxo da rede cárstica e de sistemas de cavernas (Goldscheider, 2008; Morales *et al.*, 2010; Lauber *et al.*, 2014; Barberá *et al.*, 2017; Ender *et al.*, 2018; Goepfert *et al.*, 2020). Além disso, a técnica de

*The fluorescent dye tracers technique is an excellent tool for delineating the water contribution areas of karst springs estimating flow velocity and transit time, and determining recharge and discharge areas. Dyes are synthetic organic substances that have fluorescent properties, are normally absent in natural waters, safe for human health and highly detectable, which makes them very effective. Fluorescein sodium (uranine) and rhodamine WT are considered the main conservative tracers used in karst areas. Depending on the objective and approach applied in the study, the analysis of the results can be either qualitative or quantitative (Field, 2002; Smart, 2005; Benischke *et al.*, 2007; Leibundgut *et al.*, 2009; Benischke, 2021). Quantitative analyses are based on conservative tracers, breakthrough tracer curves (BTCs), and the principles of solute transport (advection and dispersion). In these analysis it is possible to obtain data (flow velocities and dispersion coefficients) on flow transport processes in the karst network and cave systems (Goldscheider, 2008; Morales *et al.*, 2010; Lauber *et al.*, 2014; Barberá *et al.*, 2017; Ender *et al.*, 2018; Goepfert *et al.*, 2020). In addition, the fluorescent tracer technique can be used to validate and complement vulnerability maps, since they point out the recharge and infiltration points of the system, as well as flow velocities, arrival time, transit time and concentrations along the underground route sections (Zwahlen, 2004; Marín *et al.*, 2015).*

*In Brazil, karst develops mainly in limestones and dolomites from the Neoproterozoic (~740-590 Ma), which makes up about 4% of the country's continental area, where several cities use groundwater from karst systems (Rubioli *et al.* 2019). The study area comprises the Éden Cave karst hydrosystem (26 km²), in the São Miguel River basin (520 km²), in the southwest of Minas Gerais*

traçadores fluorescentes pode ser usada para validar e complementar mapas de vulnerabilidade, uma vez que eles apontam os pontos de recarga e infiltração do sistema, assim como as velocidades do fluxo, tempo de chegada, tempo de trânsito e concentrações ao longo dos trechos das rotas subterrâneas (Zwahlen, 2004; Marín *et al.*, 2015).

No Brasil, o carste se desenvolve principalmente em calcários e dolomitos do Neoproterozoico (~740-590 Ma), constituindo cerca de 4% da área continental do país, onde diversas cidades utilizam a água subterrâneas dos sistemas cársticos (Rubiolli *et al.* 2019). A área de estudo compreende o hidrossistema cárstico da Gruta Éden (~26 km²), na bacia do rio São Miguel (~520 km²), sudoeste do estado de Minas Gerais, a 220 km da capital Belo Horizonte. A bacia do rio São Miguel faz parte da região cárstica do Alto São Francisco que apresenta feições típicas de relevo cárstico, como dolinas, sumidouros, surgências, cavernas e drenagens subterrâneas. Esta região está inserida na borda da Bacia São Francisco próximo à Faixa Brasília Meridional e sistemas de falhas transcorrentes sinistrais e dobramentos. A geologia é constituída predominantemente por rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) que atua como reservatório de água subterrânea (Saadi *et al.*, 1998; Alkmim & Martins Neto, 2001; Menegasse *et al.*, 2002; Santos, 2002; Dias & Velásques, 2002; Camaduro *et al.*, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008; Freitas, 2009; SEE, 2012; Meyer, 2018; Ferrari *et al.*, 2017; Lucon *et al.*, 2020, Lucon *et al.*, 2022) (Fig. 1).

Este artigo busca mapear as áreas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico do hidrossistema da Gruta Éden na bacia do São Miguel,

*state, 220 km from the capital Belo Horizonte. The São Miguel river watershed is part of the Alto São Francisco Karst Region, which has typical karst relief features such as dolines, sinkholes, springs, caves and underground drainages. This region is located on the edge of the São Francisco watershed near the Southern Brasília Belt sinistral transcurrent faults and folds systems. The geology predominantly consists of carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation (Bambuí Group), which acts as a groundwater reservoir (Saadi *et al.*, 1998; Alkmim & Martins Neto, 2001; Menegasse *et al.*, 2002; Santos, 2002; Dias & Velásques, 2002; Camaduro *et al.*, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008; Freitas, 2009; SEE, 2012; Meyer, 2018; Ferrari *et al.*, 2017; Lucon *et al.*, 2020, Lucon *et al.*, 2022) (Fig. 1).*

This article aims to map the intrinsic vulnerability areas of the Éden Cave hydrosystem karst aquifer in the São Miguel watershed, Pains (MG), considering its complexity, aquifer heterogeneity, spatial and seasonal variations in flow and transport parameters along the main route, recharge and discharge mechanisms, and the evolution of water and speleogenetic dynamics. In addition, environmental protection measures that can serve to improve the environmental management of the hydrosystem by the public authorities are proposed.

Pains (MG), considerando a sua complexidade, heterogeneidade do aquífero, variações espacial e sazonal de parâmetros de fluxo e transporte ao longo da principal rota, mecanismos de recarga e descarga, e evolução da dinâmica hídrica e espeleogenética. Além disso, são propostas medidas de proteção ambiental que possam servir para uma melhor gestão ambiental do poder público para o hidrossistema.

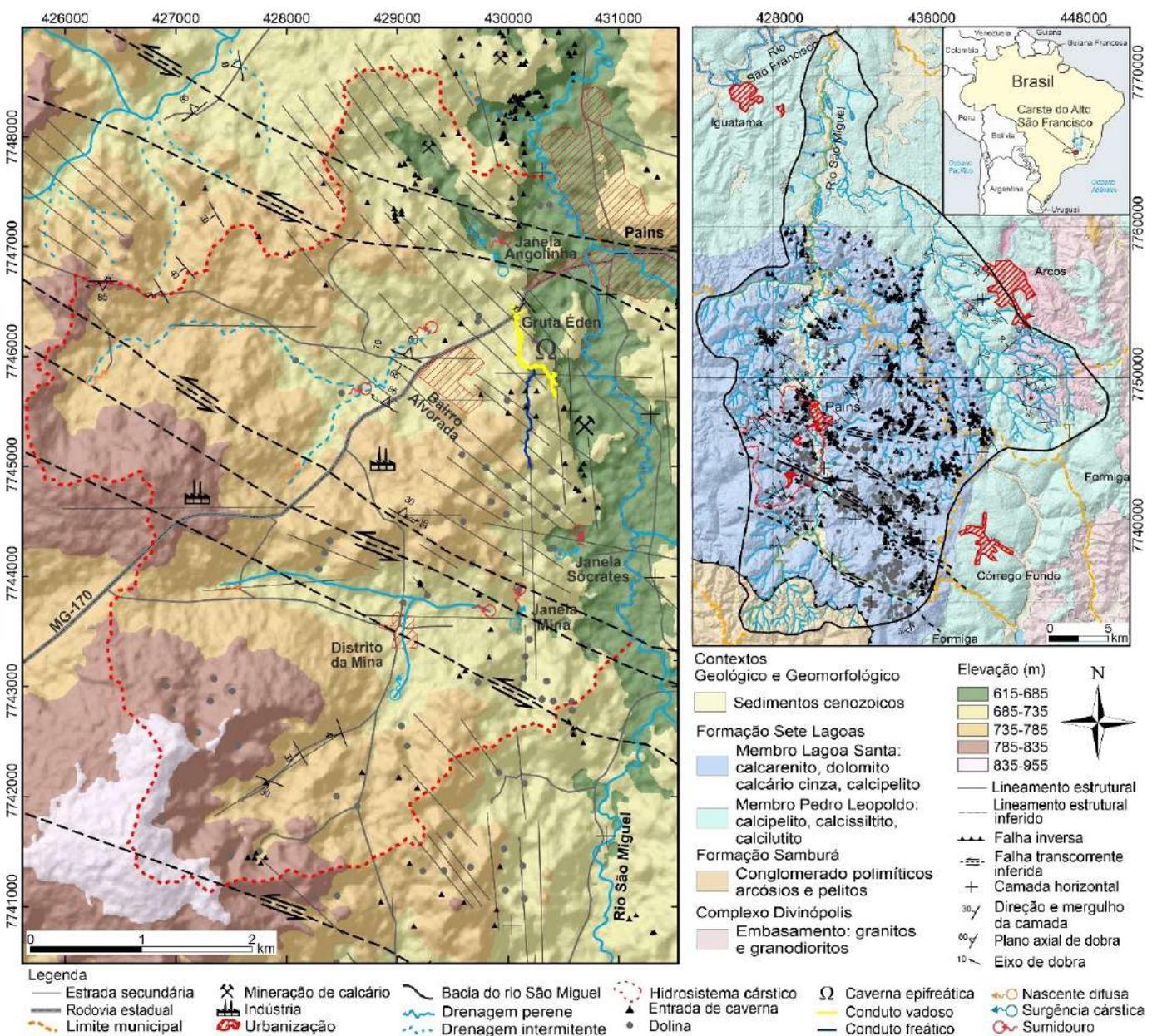
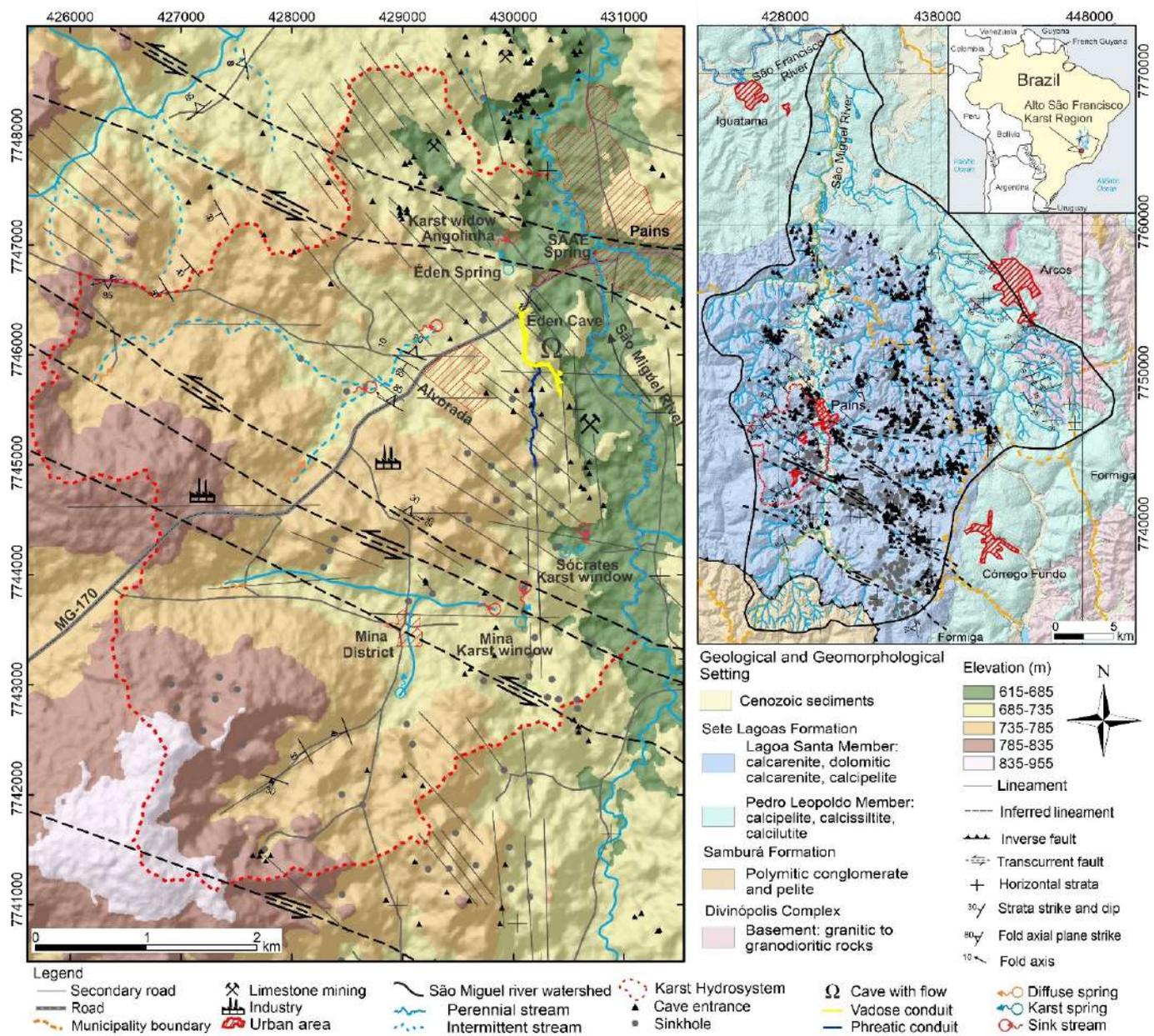


Figura 1 - Mapa mostrando a localização do hidrossistema da Gruta Éden que faz parte da bacia do rio São Miguel e o contexto geológico-estrutural, geomorfológico e espeleológico da região.



800

Figure 1 – Map showing the location of the Eden Cave hydrosystem, which is part of the São Miguel river basin, and the geological-structural, geomorphological and speleological context of the region.

MATERIAIS E MÉTODOS

Mapeamento das feições cársticas e geológico-estruturais

As feições cársticas identificadas inicialmente por meio da fotointerpretação foram verificadas durante a etapa do mapeamento de campo, que consistiu no levantamento de dados sobre o tipo de feição, suas características geomor-

MATERIALS AND METHODS

Karst and geological-structural features mapping

The karst features initially identified through photointerpretation were verified during the field mapping stage. This stage consisted of collecting data on the type of feature, its geomorphological and speleological characteristics, geogra-

fológicas e espeleológicas, posição geográfica (coordenadas), condições do entorno, condições hídricas e direções do fluxo de água. No mapeamento geológico-estrutural foi realizado um levantamento das estruturas geológicas (planos de acamamento, fraturas e falhas) que condicionam com planos de dissolução e percolação de águas meteóricas, superficiais e subterrâneas. Essas estruturas foram plotadas e identificadas em mapa geológico preexistente (Ribeiro *et al.*, 2008) e integradas às estruturas fotointerpretadas. Para isso, foram visitados pontos de afloramento e maciços de calcário, além de cavernas, onde foram levantados dados de atitudes e orientações dos planos e lineamentos estruturais. Para confecção das rosetas estruturais, foi utilizado o *software* OpenStereo 1.2, a partir das medidas estruturais obtidas em campo.

Método EPIK adaptado

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998) constitui-se de uma análise paramétrica por meio de geoprocessamento, onde são realizadas sobreposições de mapas bases de determinados parâmetros ponderados, sendo eles: (E) epicarste; (P) cobertura protetora; (I) condições de infiltração; (K) desenvolvimento da rede cárstica. Cada parâmetro, com base em valores de ponderação específicos, gera-se, então, o índice de vulnerabilidade ou fator de proteção (F), que significa: quanto menor numericamente for o F maior será a necessidade de proteção, podendo variar entre 9 (mais vulnerável) até 34 (menos vulnerável) de acordo com a equação abaixo:

$$F = \alpha E_i + \beta P_i + \gamma I_i + \delta K_i$$

*phical position (coordinates), surrounding conditions, water conditions and water flow directions. In the geological-structural mapping, a survey was carried out of the geological structures (bedding planes, fractures and faults) that condition dissolution planes and percolation of meteoric, surface and underground water. These structures were plotted and identified on a pre-existing geological map (Ribeiro *et al.*, 2008) and integrated with the photointerpreted structures. To do this, limestone massifs outcrops and caves were visited, where data on the attitudes and orientations of the structural planes and lineaments were collected. Based on the structural measurements obtained in the field, OpenStereo 1.2 software was used to make the structural rosettes.*

Adapted EPIK method

The EPIK method (Doerfliger & Zwahlen, 1998) consists of a parametric analysis using geoprocessing, where base maps of certain weighted parameters are superimposed: (E) epikarst; (P) protective cover; (I) infiltration conditions; (K) development of the karst network. Each parameter, based on specific weighting values, then generates the vulnerability index or protection factor (F), which means: the lower the F numerically, the greater the need for protection, which can range from 9 (most vulnerable) to 34 (least vulnerable) according to the equation below:

$$F = \alpha E_i + \beta P_i + \gamma I_i + \delta K_i$$

onde F = índice de proteção; E_i , P_i , I_i , K_i = classificação relativa aos parâmetros EPIK; e $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 3$, $\delta = 2$, ambos sendo os coeficientes de ponderação.

Pereira *et al.* (2019) adaptaram o método considerando as diferenças de contextos geomorfológicos e hidrológicos entre as áreas cársticas do Brasil e da Europa, este último onde o método foi desenvolvido. Esta modificação foi realizada dentro do contexto da bacia hidrográfica do rio São Miguel, onde está o hidrossistema da Gruta Édén e, por isso, foi adotada essa adaptação do método para este trabalho. Os autores propõem modificações nos parâmetros para cada mapa base de acordo com a descrição das classificações apresentadas na Figura 2. Diferentemente do proposto por Doerfliger & Zwahlen (1998) e Pereira *et al.* (2009), neste trabalho, é feita uma separação e subdivisão das classes de baixa e moderada vulnerabilidades referentes ao fator F (Figura 2). Essa modificação é proposta julga-se ser importante que haja uma distinção dessas duas classes, uma vez que elas podem ser expostas a distintas condições antrópicas, que devem ser levadas em contas para uma melhor gestão ambiental do poder público.

Todas as informações referentes a cada parâmetros foram levantados durante a etapa de escritório (levantamento preexistentes e fotointerpretação) e durante a etapa de campo (mapeamento das feições cársticas e estruturais). Na etapa de geoprocessamento foi utilizado o software ArcGis 10.5; para a confecção dos mapas bases foi empregada a ferramenta de reclassificação para ajustar os arquivos raster de acordo com os pesos de cada classe. Para o mapa base de epicarste (E), foram considerados pontos de dolinas e lineamentos estruturais, sendo adicionado um buffer 50 m no entorno das feições,

where F = protection index; E_i , P_i , I_i , K_i = classification relative to EPIK parameters; and $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 3$, $\delta = 2$, both being the weighting coefficients.

Pereira *et al.* (2019) adapted the method considering the differences in geomorphological and hydrological contexts between karst areas in Brazil and Europe, where the method was developed. This modification was carried out within the context of the São Miguel river watershed, where the Édén Cave hydrosystem is located, which is why this adaptation was used for this work. The authors propose modifications to the parameters for each base map according to the description of the classifications shown in Figure 2. Unlike the proposal by Doerfliger & Zwahlen (1998) and Pereira *et al.* (2009), this work separates and subdivides the low and moderate vulnerability classes in relation to the F factor (Figure 2). This modification is proposed because it is considered important to distinguish between these two classes, since they can be exposed to different anthropogenic conditions, which must be taken into account for better environmental management by public authorities.

All the information relating to each parameter was collected during the office stage (pre-existing surveys and photointerpretation) and during the field stage (mapping of karst features and structures). ArcGis 10.5 software was used in the geoprocessing stage; the reclassification tool was used to make the base maps, adjusting the raster files according to the weights of each class. For the epikarst base map (E), doline points and structural lineaments were considered, and a 50 m buffer was added around the features, considering a radius of influence. For the protective cover base map (P), the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation tool was used for soil thickness values. The infiltration base map (I) considered the use and occupation

essa distância considerando um raio de influência das feições. Para o mapa base de cobertura de proteção (P), foi utilizado a ferramenta de interpolação Inverse Distance Weighted (IDW) para valores de espessuras de solo. O mapa base de infiltração (I) considerou os mapas de uso e ocupação (Pereira et al., 2019), de declividade gerado a partir do modelo digital de terreno ALOS/PALSAR, e as depressões fechadas e sumidouros. Para a rede cárstica (K), foram considerados pontos de entradas de cavernas obtidos pelo CANIE/CECAV e o mapa da Gruta Éden, sendo adicionado um buffer 250 m entorno das feições, considerando a área de influência preliminar segundo a legislação vigente. Para o mapa final de vulnerabilidade utilizou-se a ferramenta de calculadora raster para a álgebra de mapas (sobreposição) com base nos coeficientes de ponderação α , β , γ , δ .

maps (Pereira et al., 2019), slope generated from the ALOS/PALSAR digital terrain model, and closed depressions and sinkholes. For the karst network (K), cave entry points obtained from CANIE/CECAV and the Éden Cave map were taken into account, and a 250 m buffer was added around the features, considering the preliminary area of influence according to current legislation. For the final vulnerability map, the raster calculator tool was used for map algebra (overlapping) based on the weighting coefficients α , β , γ , δ .

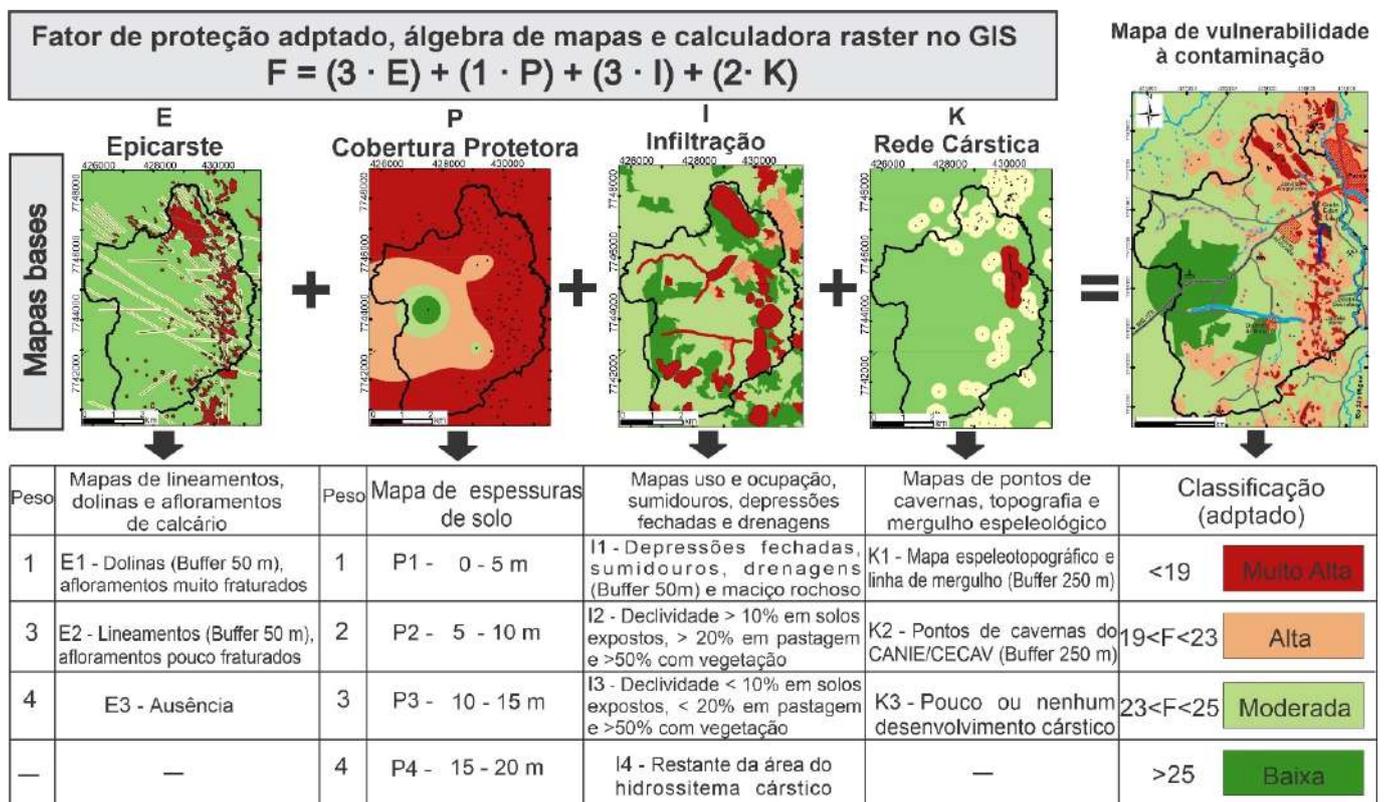


Figura 2 – Quadro resumo da metodologia adapta do método EPIK, destacando os pesos e especificações de cada parâmetros, bem como a equação e seus coeficientes de ponderação.

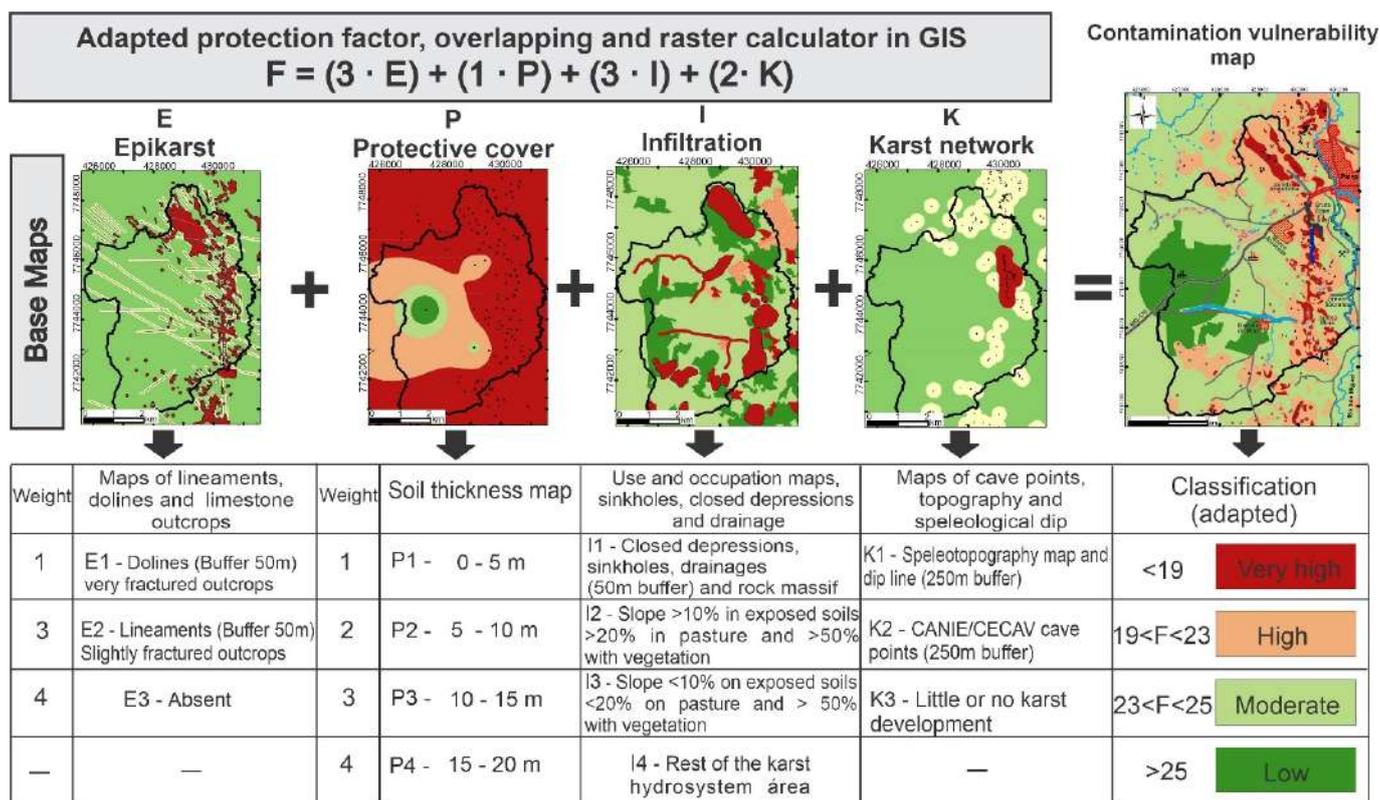


Figure 2 – Summary table of the methodology adapted from the EPIK method, highlighting the weights and specifications of each parameter, as well as the equation and its weighting coefficients.

Traçadores corantes fluorescentes

Para compreender, temporal e espacialmente, o comportamento hidrodinâmico da principal rota de fluxo do sistema cárstico da Gruta Éden, foram realizados dois testes quantitativos de traçadores fluorescentes durante os meses de setembro de 2020 (estação seca) e abril de 2021 (estação chuvosa). Para isso, foram usados os pontos de injeção e monitoramento ao longo da rota já identificados por estudos anteriores (Camaduro, 2007; Freitas, 2009; Ferrari et al., 2017). Assim, foram estabelecidos um ponto de injeção (IP1) e três pontos de amostragem (SP1, SP2 e SP3) em surgências e em cavernas (Fig. 3). Foram injetados 300 g de fluoresceína (Nº. CAS: 518-47-8) no sumidouro do córrego da Mina (IP1). O monitoramento das curvas de restituição dos traçadores (BTCs) foi realizado

Fluorescent dye tracers

In order to gain a temporal and spatial understanding of the hydrodynamic behavior of the main flow route of the Éden Cave karst system, two quantitative fluorescent tracer tests were carried out during the months of September 2020 (dry season) and April 2021 (rainy season). For this, the injection and monitoring points along the route already identified by previous studies were used (Camaduro, 2007; Freitas, 2009; Ferrari et al., 2017). Therefore, an injection point (IP1) and three sampling points (SP1, SP2 and SP3) were established in springs and caves (Fig. 3). 300 g of fluorescein (CAS No.: 518-47-8) was injected into the Mina stream sinkhole (IP1). Breakthrough tracer curves (BTCs) were monitored at the Socrates spring (SP1), inside Éden Cave (SP2), and at the Angolinha spring (SP3), which is the main outlet (discharge) of

na surgência do Sócrates (SP1), dentro da Gruta Éden (SP2), e na surgência da Angolinha (SP3), que é a saída (descarga) principal do hidrossistema. As quantidades de massas injetadas e pontos de monitoramentos foram as mesmas nas duas estações com o intuito de comparação entre as estações sazonais.

A amostragem quantitativa das concentrações dos traçadores recuperados foi possível utilizando-se dois fluorímetros de campo GGUN-FL30 (modelos 1920 e 1921) (Schneegg, 2002), calibrados antes de cada campanha de campo. O intervalo de tempo de registro foi de 15 min em todos os pontos e estações, para obter um melhor detalhamento das BTCs. As concentrações de *background* foram obtidas nos dias anteriores ao início de cada teste, com os fluorímetros de campo, registrando durante 48 horas as concentrações naturais de fluorescência deste hidrossistema cárstico, a fim de corrigir possíveis valores de concentrações dos traçadores. O resumo das informações de injeções e amostragens estão na Tabela 1 e na Fig. 3. As vazões foram medidas a partir do uso de molinete.

the hydrosystem. The quantities of mass injected and the monitoring points were the same at both stations in order to compare the seasonal stations.

Quantitative sampling of recovered tracer concentrations was possible using two GGUN-FL30 field fluorimeters (models 1920 and 1921) (Schneegg, 2002), calibrated before each field campaign. The recording time interval was 15 min at all points and stations, in order to obtain a better detail of the BTCs. Background concentrations were obtained in the days prior to the start of each test, with the field fluorimeters recording the natural fluorescence concentrations of this karst hydrosystem for 48 hours, in order to correct for possible tracer concentration values. A summary of the information on injections and sampling is shown in Table 1 and Fig. 3. Flow rates were measured using a windlass.

Tabela 1 – . Informações dos testes de traçadores injetados no hidrossistemas da Gruta Éden.

SEÇÃO	A-A'	
Traçador	Fluoresceína sódica	
Massa injetada (g)	300	
Ponto de injeção	IP1 – Sumidouro da Mina	
Estação	Seca	Chuva
Injeção (data/hora)	30/08/20	21/03/21
	10:20	12:15
Background (µg/L)	0,06	0,09

SEÇÃO	A-A'	
	IP1-SP1	862
Distâncias lineares (m)	IP1-SP2	2.383
	IP1-SP3	3.393

Table 1 – Information on tracer tests injected in Éden cave hidrosystem.

SECTION	A-A'	
Tracer	Fluorescein sodium	
Injected mass (g)	300	
Injection Point	IP1 – Mina Sinkhole	
Station	Dry	Rainy
Injection (date/time)	30/08/20	21/03/21
	10:20	12:15
Background (µg/L)	0,06	0,09
Linear distances (m)	IP1-SP1	862
	IP1-SP2	2.383
	IP1-SP3	3.393

A partir dos dados obtidos pelos testes quantitativos, foram realizadas análises gráficas das BTCs por meio do *software* QTRACER2 (Field, 2002) e foram estimados a concentração de pico (C_p), tempo de chegada (t_1), tempo de pico (t_p), tempo quando metade da massa recuperada passa pelo ponto de amostragem ($t_{R/2}$), massa recuperada (R) e tempo médio de trânsito (t_m). A velocidade máxima ($v_{m\acute{a}x}$) foi calculada a partir do tempo de chegada. Optou-se por obter as velocidades médias de fluxo e coeficiente de dispersão por meio de modelos analíticos, descritos a seguir, pois eles estimam esses parâmetros com menos incertezas.

From the data obtained by the quantitative tests, graphical analyses of the BTCs were carried out using the QTRACER2 software (Field, 2002). In addition, the peak concentration (C_p), arrival time (t_1), peak time (t_p), time when half of the recovered mass passes through the sampling point ($t_{R/2}$), recovered mass (R) and mean transit time (t_m) were estimated. The maximum velocity ($v_{m\acute{a}x}$) was calculated from the arrival time. To obtain the mean flow velocities and dispersion coefficient the analytical models described below were chosen, as they estimate these parameters with fewer uncertainties.

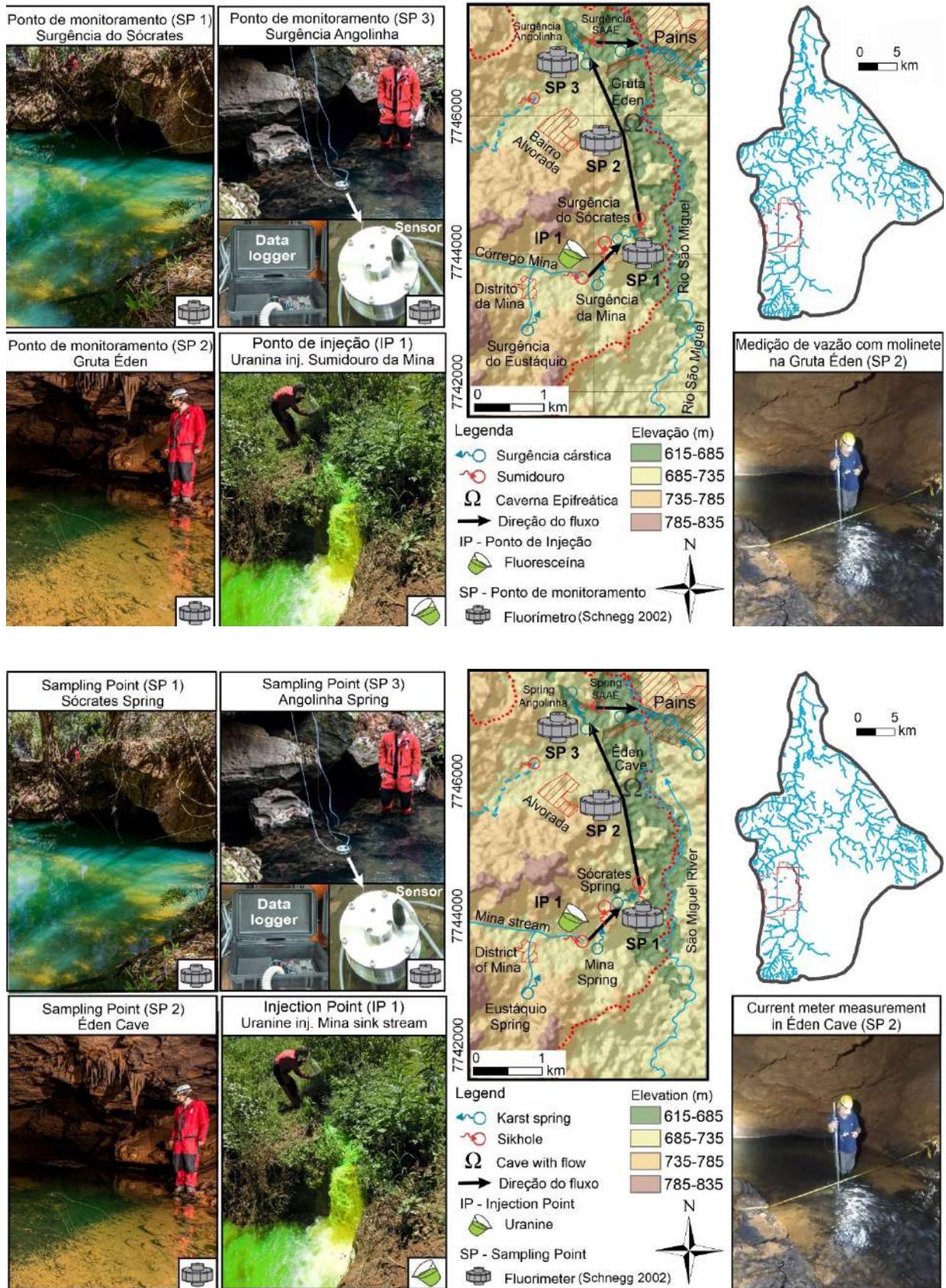


Figura 3 - Esquema metodológico da técnica de traçadores corantes, com localizações e fotos de pontos de amostragem (fluorímetro de campo - datalogger e sensor), pontos de injeção de traçador de corante (fluoresceína) e medição de vazão com molinete.

Figure 3 - Methodological scheme of the dye tracer technique, with locations and photos of sampling points (field fluorimeter - datalogger and sensor), dye tracer injection points (fluorescein) and flow measurement with a reel.

RESULTADOS

Arcabouços geológico-estrutural e espeleológico

O arcabouço estrutural em que o sistema está inserido é constituído por lineamentos estruturais, identificado como fraturas, falhas e eixos de dobras, com frequência majoritária na direção NW-SE e na direção secundária N-S, como visto no diagrama de rosetas da Figura 4. Os planos de acamamento (S_0) são sub-horizontais na porção leste do sistema, em afloramentos de calcário próximo ao rio São Miguel. Na porção central e oeste, os S_0 apresentam dobrados com eixos de dobra na direção NW-SE. Assim, há um sistema de dobras anticlinais e sinclinais, onde, em escala de afloramento, apresentam-se fechadas, do tipo Chevron, e em escala local, abertas (Fig. 4 - fotos a esquerda). Além disso, há zonas de falhas transcorrentes sinistrais (Muzzi Magalhães, 1989), interpretadas como posteriores ao sistema de dobramento seccionando praticamente toda a área de estudo, bem como pares conjugados de fraturas subverticais que estão associadas as zonas de falhamento.

A Gruta Éden é a principal e maior cavidade do hidrossistema da margem leste do rio São Miguel, apresentando um desenvolvimento horizontal com uma zona vadosa de 572 m, uma zona epifreática de 746 m e uma zona freática de 412 m, totalizando 1.730 m de caverna mapeada (Ferrari et al., 2017). A direção de desenvolvimento principal da Gruta Éden é N-S, concordante com a direção de lineamentos N-S e a direção de fluxo do rio São Miguel. As demais cavidades estão predominantemente na zona vadosa do sistema,

RESULTS

Geological-structural and speleological frameworks

The structural framework of the system is made up of structural lineaments, identified as fractures, faults and fold axes, mostly in the NW-SE direction and in the secondary N-S direction, as seen in the rosette diagram in Figure 4. The bedding planes (S_0) are sub-horizontal in the eastern part of the system, in limestone outcrops near the São Miguel river. In the central and western portions, the S_0 are folded with fold axes in a NW-SE direction. Thus, there is an anticlinal and synclinal folds system, that are closed and Chevron-like on an outcrop scale, and open on a local scale (Fig. 4 - photos on the left). In addition, there are sinistral transcurrent fault zones (Muzzi Magalhães, 1989), interpreted as subsequent to the folding system, sectioning practically the entire study area, as well as conjugate pairs of subvertical fractures that are associated with the fault zones.

The Éden Cave is the main and largest cave in the hydrosystem on the east bank of the São Miguel River. It has a horizontal development with a vadose zone of 572 m, an epiphreatic zone of 746 m and a phreatic zone of 412 m, totaling 1,730 m of mapped cave (Ferrari et al., 2017). The main direction of development of the Éden Cave is N-S, in line with the direction of the N-S lineaments and the São Miguel River flow direction. The other caves are predominantly in the vadose zone of the system, with 61 cave entrances, 50 dolines and 14 closed depressions identified. These features are associated with the structural lineaments, mainly aligned in NW-SE and N-S directions, or associated with the intersections of the same lineaments.

sendo identificadas 61 entradas de cavernas, 50 dolinas e 14 depressões fechadas. Estas feições estão associadas às direções de lineamentos estruturais, alinhadas principalmente nas direções NW-SE e N-S, ou associadas às intersecções dos mesmos lineamentos.

Uma característica importante deste hidrossistema é a presença de janelas cársticas ao longo da trajetória do fluxo, permitindo a exposição da água subterrânea em superfície em curtos trechos, caracterizado por uma surgência e logo em seguida um sumidouro. Nota-se a presença de, pelo menos, três destas, representado pela janela da Mina à montante, pela janela do Sócrates no meio do trajeto e pela janela da Angolinha à jusante (Fig. 7). Essa constatação também foi levantada por outros autores que estudaram o fluxo subterrâneo deste sistema (Freitas, 2009; Ferrari *et al.*, 2017).

An important feature of this hydrosystem is the presence of karst windows along the flow path that allow the groundwater to be exposed at the surface in short stretches, characterized by a spring and then a sinkhole. There are at least three of these, represented by the Mina karst window upstream, the Sócrates karst window in the middle of the path and the Angolinha karst window downstream (Fig. 7). This was also discovered by other authors who studied the underground flow of this system (Freitas, 2009; Ferrari *et al.*, 2017).

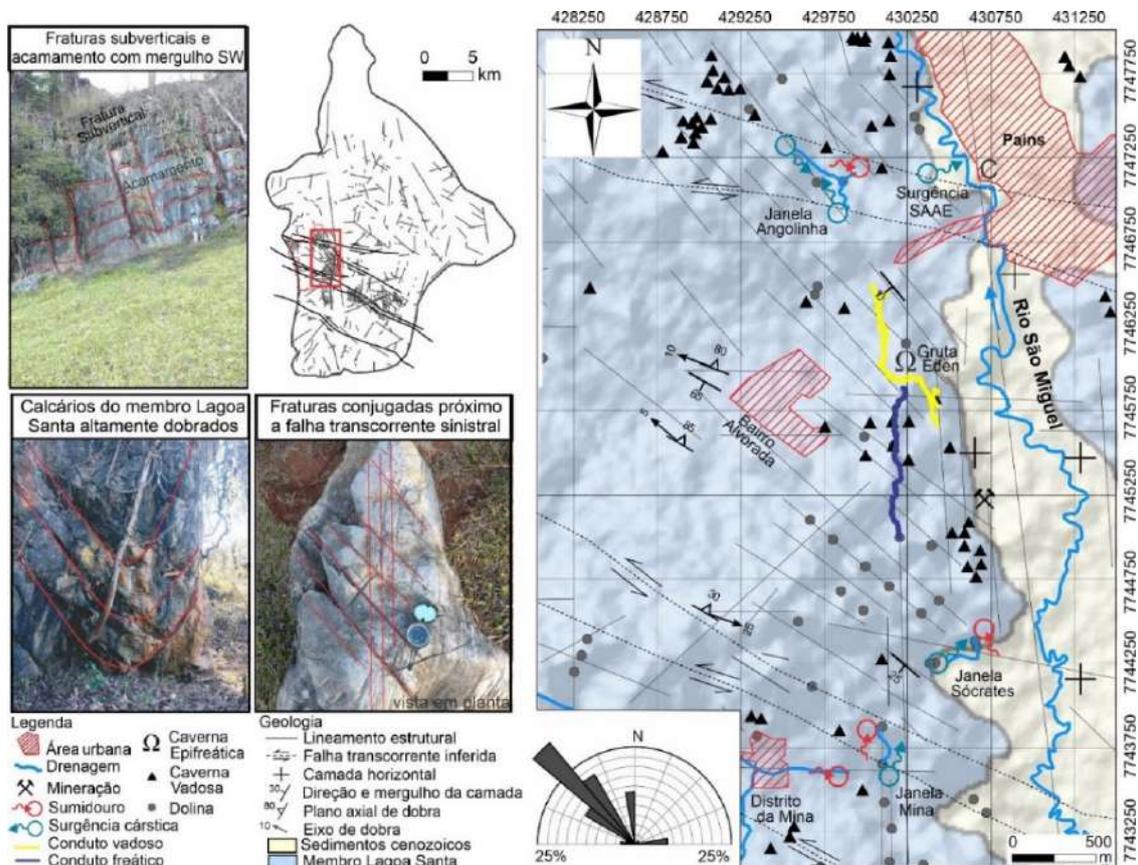


Figura 4 - Contexto da geologia e do arcabouço estrutural do hidrossistema da Gruta Éden, destacando os pontos observados em campos evidenciados nas fotos a esquerda.

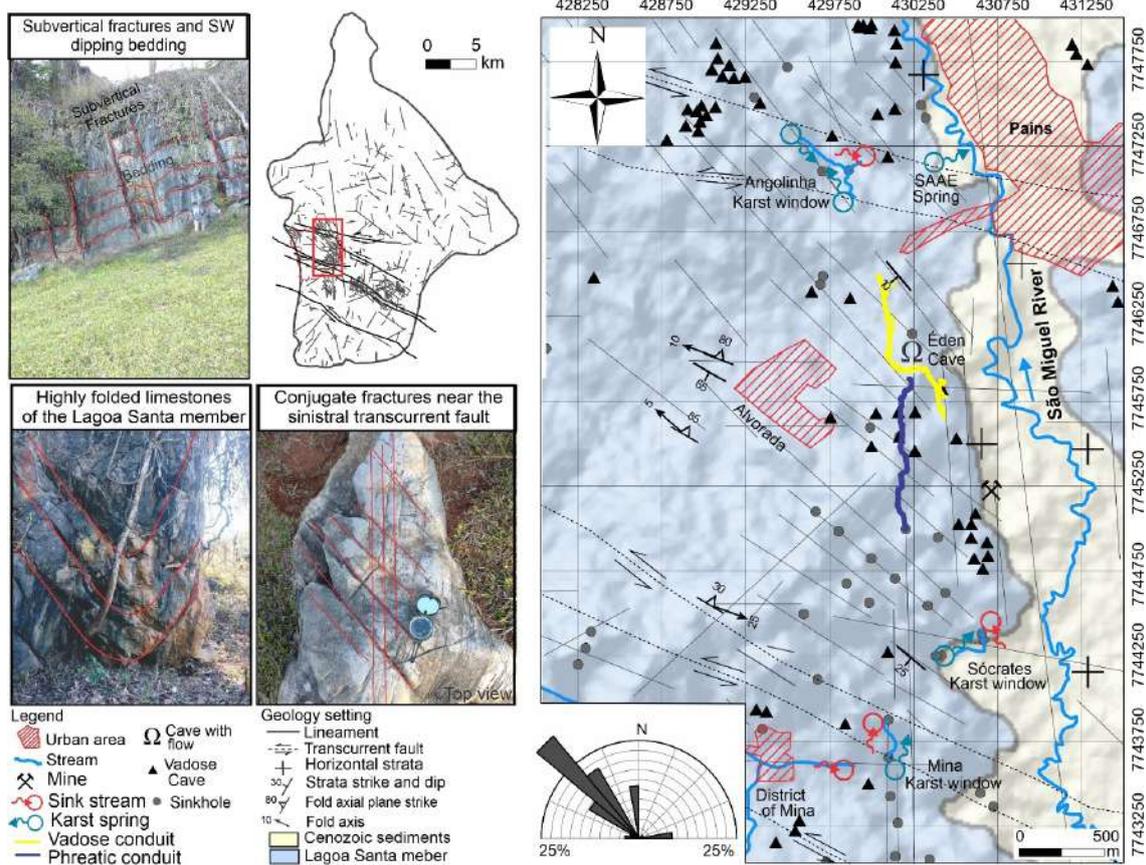


Figure 4 – Context of the geology and structural framework of the Éden Cave karst hydrosystem, highlighting the points observed in the fields shown in the photos on the left.

Vulnerabilidade cárstica (EPIK)

O fator F para a área do hidrossistema variou entre 9 e 33, sendo classificado em quatro zonas de vulnerabilidade muito alta (≤ 19), alta (19 a 23), moderada (23 a 25) e baixa (≥ 25). As áreas de baixa vulnerabilidade ocorrem na parte oeste e representa 15% da área do sistema; são regiões com recargas mais difusas, devido ao solo e ausência de cavidades, além de maiores espessuras de solos e com vegetação arbórea não nativa proveniente de silvicultura. As zonas de moderada vulnerabilidade são predominantes e recobrem 46% da área; são bem dispersas ocorrendo em toda parte central, sul e norte. Nestas regiões, são comuns a ausência de vegetação e o predomínio de pastagens, mas ainda apresentam uma espes-

Karst vulnerability (EPIK)

The F factor for the hydrosystem area varied between 9 and 33, and was classified into four zones of very high (≤ 19), high (19 to 23), moderate (23 to 25) and low (≥ 25) vulnerability. The low vulnerability areas occur in the western part and represent 15% of the system's area; they are regions with more diffuse recharge, due to the soil and absence of caves, as well as greater soil thicknesses and non-native tree vegetation from forestry. Moderate vulnerability zones are predominant and cover 46% of the area; they are well dispersed and occur throughout the central, southern and northern parts. In these regions, the absence of vegetation and the predominance of pastures are common, but they still have a moderate soil thickness, where recharge is still

sura de solo moderada, onde a recarga ainda é difusa pelo solo e sedimentos inconsolidados próximos às margens do rio São Miguel. As áreas de muito alta e alta vulnerabilidade estão associadas entre si e constitui 39% da área. Ocorrem principalmente na parte leste onde estão localizadas as maiores concentrações de entradas de cavernas, dolinas, sumidouros, i.e., feições de recarga autogênica e pontual. Além disso, apresentam pequenas espessura de solo e maiores áreas de afloramento de calcários, sendo influenciadas pelos parâmetros de desenvolvimento cárstico (K), epicarste (E) e infiltração (I).

diffused by the soil and unconsolidated sediments near the São Miguel River banks. The areas of very high and high vulnerability are associated with each other and make up 39% of the area. They occur mainly in the eastern part where the highest concentrations of cave entrances, dolines, sinkholes, i.e. autogenic and punctual recharge features, are located. They also have smaller soil thicknesses and larger areas of limestone outcrop, and are influenced by the parameters of karst development (K), epicarst (E) and infiltration (I).

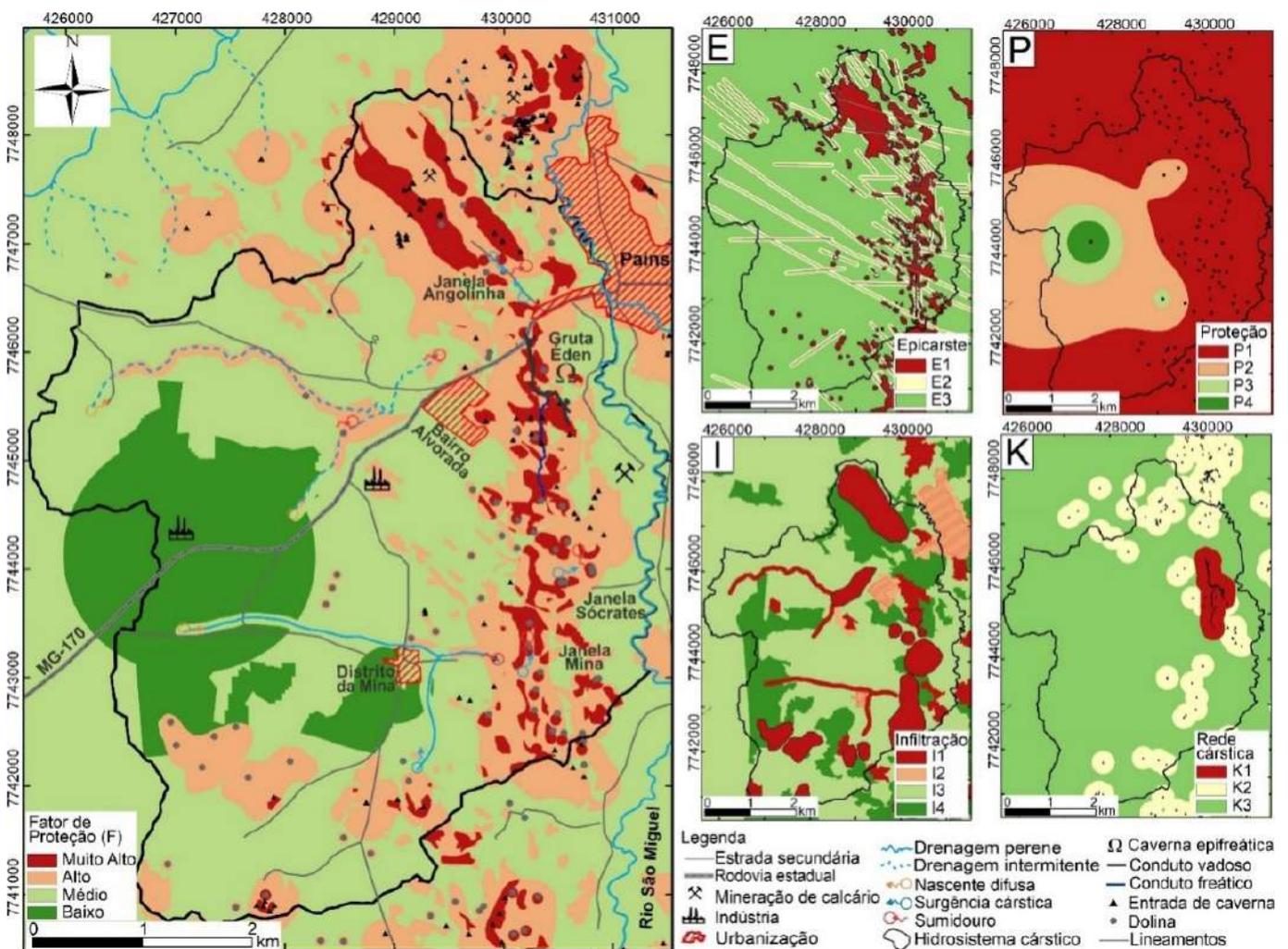


Figura 5 - Mapa de vulnerabilidade intrínseca à contaminação representando o fator de proteção (F), com base nos mapas bases E, P, I e K, à direita.

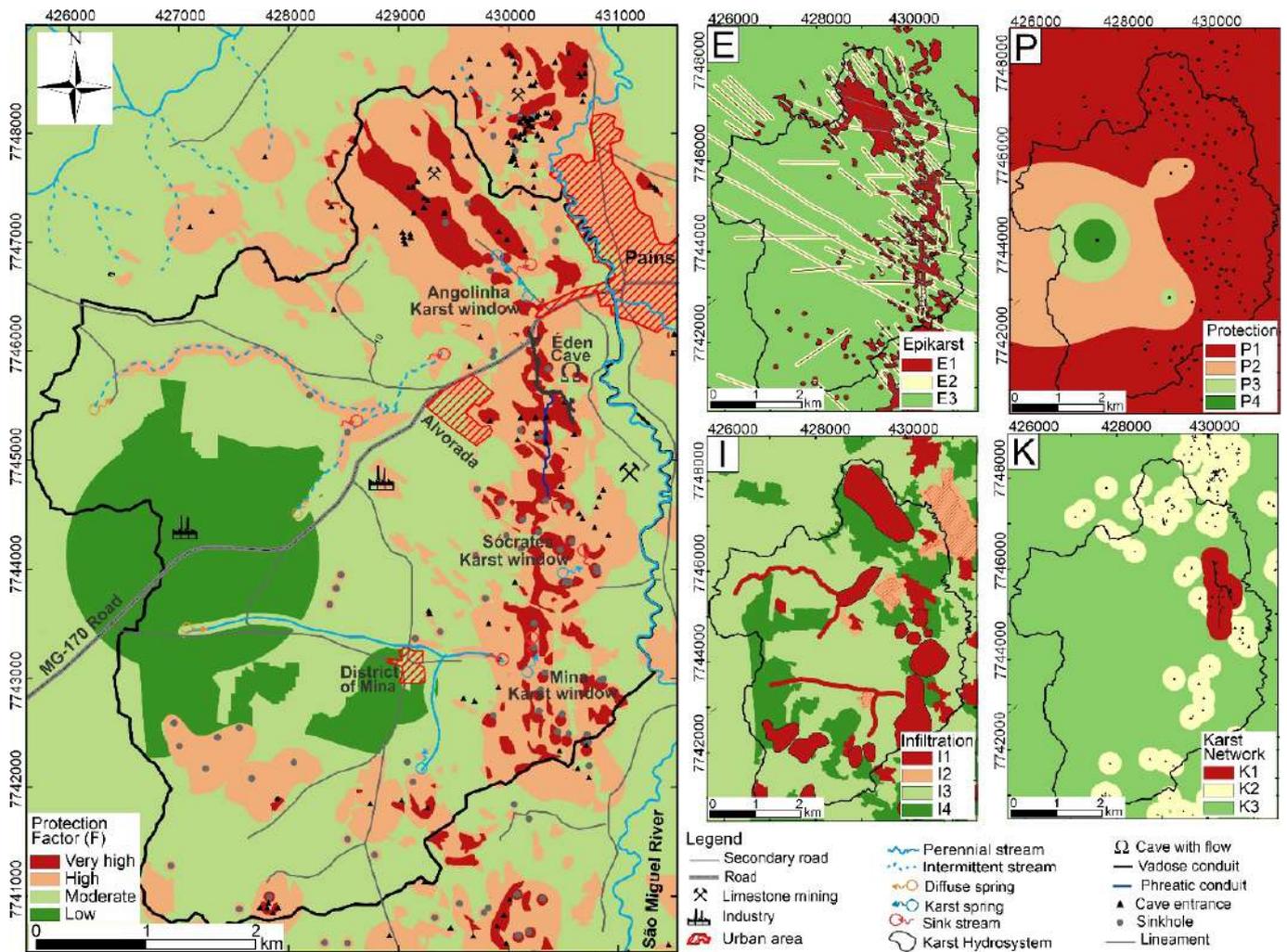


Figure 5 – Map of intrinsic vulnerability to contamination representing the protection factor (F) based on the base maps E, P, I and K, on the right.

Parâmetros das curvas de restituição e do fluxo

Para a principal rota do hidrossistema da Gruta Édén, foram obtidas seis BTCs, entre a seca e chuva, nos três pontos de amostragem (SP1, SP2 e SP3). Em SP1, a vazão variou de 569 m³/h para 834 m³/h; em SP2, de 587m³/h para 911 m³/h; e em SP5, de 594 m³/h para 1.084 m³/h (Fig. 6).

O trecho IP1-SP1 apresentou variação, entre as estações de seca e de chuva, para a massa recuperada (R) de 56% a 68%. Para os demais, houve diminuições do tempo médio de trânsito (tm) de 75 h para 52 h; tempo de chegada (t1) de 42 h para 19 h; do tempo de pico de (tp) de 61 h para

Breakthrough curves and flow parameters

For the main route of the Édén Cave hydrosystem, between dry and rainy season, six BTCs were obtained at the three sampling points (SP1, SP2 and SP3). At SP1, the flow varied from 569 m³/h to 834 m³/h; at SP2, from 587 m³/h to 911 m³/h; and at SP5, from 594 m³/h to 1,084 m³/h (Fig. 6).

The IP1-SP1 stretch showed a variation in recovered mass (R) of 56% to 68% between the dry and rainy seasons. For the others, there were decreases in mean transit time (tm) from 75 h to 52 h; arrival time (t1) from 42 h to 19 h; peak time (tp) from 61 h to 30 h; time when half the recovered mass passes

30 h; do tempo quando metade da massa recuperada passa pelo ponto de amostragem ($t_{R/2}$) de 69 h para 42 h e da concentração de pico (C_p) de 10.1 $\mu\text{g/L}$ para 7.7 $\mu\text{g/L}$. O trecho IP1-SP2 teve R variando de 68% a 93%, mantendo as tendências de diminuições de t_m de 118 h para 73 h; t_1 de 82 h para 39 h; t_p de 106 h para 53 h; $t_{R/2}$ de 114 h para 66 h; e C_p de 10.3 $\mu\text{g/L}$ para 8.9 $\mu\text{g/L}$. Em IP1-SP3, R variou de 48% a 79% com diminuições de t_m de 140 h para 91 h; t_1 de 106 h para 50 h; t_p de 169 h para 25 h; $t_{R/2}$ de 138 h para 81 h; mas um leve aumento de C_p de 13.2 $\mu\text{g/L}$ para 17.9 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 6). Os parâmetros do fluxo, como velocidade média (v_m) e dispersão longitudinal (D_L), aumentaram progressivamente ao longo do trajeto do traçador, sendo que as médias de v_m foram de 23,55 m/h a 37,40 m/h e as de D_L foram de 115 m^2/h a 622 m^2/h , seguido de um aumento nas médias das velocidades máximas (v_{max}) entre os períodos seco (35,15 m/h) e chuvoso (70,18 m/h) (Fig. 6).

Comparando todos os trechos, há um aumento nas recuperações do traçador e uma diminuição dos tempos de trânsito, de chegada, de pico e na concentração de pico, juntamente com o aumento das vazões no período de chuva. Entretanto, ressalta-se o fato de a recuperação do traçador ser maior à jusante, em SP2 (Caverna do Éden) e em SP3 (Surgência da Angolinha), e menor à montante, em SP1 (Surgência do Sócrates), tanto na seca quanto na chuva (Fig. 6). Além disso, o padrão geométrico das BTCs exibe mais de um pico de concentração (multipico ou multifluxo). As possíveis causas desses comportamentos são explicadas no item de discussão a seguir.

the sampling point ($t_{R/2}$) from 69 h to 42 h and peak concentration (C_p) from 10.1 $\mu\text{g/L}$ to 7.7 $\mu\text{g/L}$. The IP1-SP2 stretch had R ranging from 68% to 93%, maintaining the trends of decreases in t_m from 118 h to 73 h; t_1 from 82 h to 39 h; t_p from 106 h to 53 h; $t_{R/2}$ from 114 h to 66 h; and C_p from 10.3 $\mu\text{g/L}$ to 8.9 $\mu\text{g/L}$. In IP1-SP3, R varied from 48% to 79% with decreases in t_m from 140 h to 91 h; t_1 from 106 h to 50 h; t_p from 169 h to 25 h; $t_{R/2}$ from 138 h to 81 h; but a slight increase in C_p from 13.2 $\mu\text{g/L}$ to 17.9 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 6). The flow parameters, such as mean velocity (v_m) and longitudinal dispersion (D_L), increased progressively along the tracer path. The mean v_m ranged from 23.55 m/h to 37.40 m/h and D_L ranged from 115 m^2/h to 622 m^2/h , followed by an increase in the mean maximum velocities (v_{max}) between the dry (35.15 m/h) and rainy (70.18 m/h) periods (Fig. 6).

Comparing all the stretches, there is an increase in tracer recovery and a decrease in transit times, arrival times, peak times and peak concentration, along with an increase in flow rates during the rainy season. However, it is noteworthy that tracer recovery is higher downstream in SP2 (Éden Cave) and SP3 (Angolinha spring), and lower upstream in SP1 (Socrates spring), both during dry and rainy season (Fig. 6). In addition, the geometric pattern of the BTCs shows more than one concentration peak (multi-peak or multi-flow). The possible causes of these behaviors are explained in the discussion below.

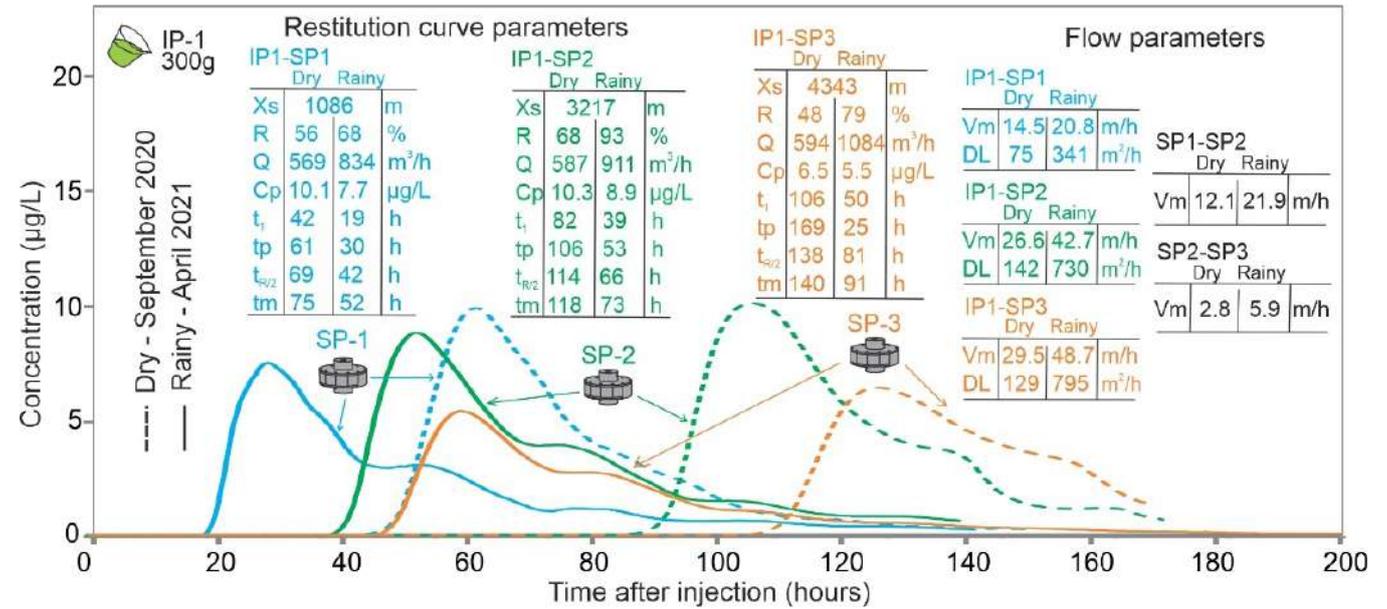
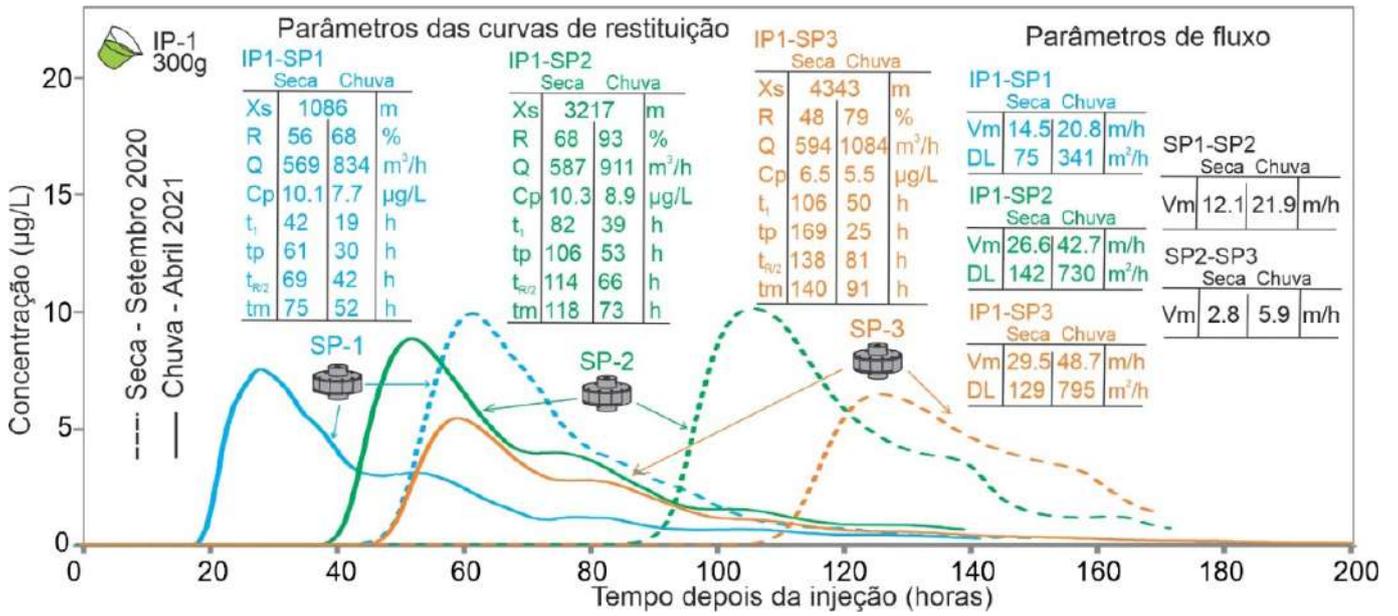


Figura 6 - Curvas de restituição dos traçadores durante as estações de seca (tracejado) e chuva (contínuo), comparando os parâmetros de cada trecho das seções.

Figure 6 - Breakthrough tracer curves during the dry (dashed) and rainy (continuous) seasons, comparing the parameters of each section.

DISCUSSÃO

Hidrodinâmica e vulnerabilidade cárstica

Os lineamentos estruturais NW-SE estão relacionados tanto aos eixos das dobras quanto ao sistema de falhas transcorrentes sinistrais regionais (Muzzi Magalhães, 1989), onde os lineamentos N-S, relacionados a falhas normais posteriores, cortam as demais estruturas (Saadi, 1991). A ocorrência de janelas cársticas provavelmente está ligada à condição geológico-estrutural local, influenciada por sistemas dobrados formados por anticlinais e sinclinais. O acamamento dobrado promove zonas de carstificação por onde o fluxo é facilmente transmitido formando um padrão de loops, forçando-o ascender nas charneiras das anticlinais e mergulhar no sentido das charneiras dos sinclinais. Esse mecanismo também foi constatado por outros autores (Goldscheider, 2005). Assim, as janelas cársticas atuam como trechos de exposição do fluxo à possíveis contaminações e elas estão relacionadas às classes de muito alta e alta vulnerabilidade cárstica apontadas pelo método EPIK.

Apesar da alta frequência de lineamentos estruturais de direção NW-SE, o sentido preferencial do fluxo é N-S, explicado pela carstificação mais desenvolvida nos lineamentos desta direção e devido ao controle hidráulico que o rio São Miguel (de direção N-S) exerce sobre o afluente subterrâneo. A Gruta Éden retrata bem essa carstificação N-S, em que a zona vadosa é caracterizada por paleocanais e depósitos de sedimentos, indicando que houve rebaixamento do nível do aquífero, conforme as hipóteses de evolução do carste da região proposta por Saadi

DISCUSSION

Hydrodynamics and karst vulnerability

The NW-SE structural lineaments are related to both the fold axes and the regional sinistral transcurrent fault system (Muzzi Magalhães, 1989), where the N-S lineaments, related to later normal faults, cut through the other structures (Saadi, 1991). The occurrence of karst windows is probably linked to the local geological-structural condition, influenced by folded systems formed by anticlines and synclines. The folded bedding promotes karstification zones through which the flow is easily transmitted, forming loop patterns, forcing it to rise in the hinges of the anticlines and plunge towards the hinges of the synclines. Other authors (Goldscheider, 2005) have also observed this mechanism. Therefore, the karst windows expose flow stretches to possible contamination and they are related to the very high and high karst vulnerability classes as indicated by the EPIK method.

Despite the high frequency of NW-SE structural lineaments, the preferential flow direction is N-S, which is explained by the more developed karstification in the lineaments in this direction and due to the hydraulic control that the São Miguel River (N-S direction) exerts over the underground tributary. The Éden Cave is a good illustration of this N-S karstification, in which the vadose zone is characterized by paleochannels and sediment deposits, indicating that the aquifer level has been lowered, according to the hypotheses of karst evolution in the region proposed by Saadi et al. (1980) and Santos (2002). On the other hand, the epiphreatic and phreatic zones are the current stage of karstification, with perennial underground streams

et al. (1980) e Santos (2002). Por outro lado, as zonas epifreática e freática são o atual estágio da carstificação, com drenagens subterrâneas perenes situadas no nível inferior da caverna, constatados pelos testes de traçadores.

Na parte oeste e central do hidrossistema a recarga ocorre de forma difusa e alogênica, através do solo e do epicarste pouco desenvolvido, além de possuir zonas de descarga pontuais que formam surgências menores dando origem às drenagens superficiais. Devido à essa característica, essa região é considerada de baixa e moderada vulnerabilidades, embora, no entorno das drenagens superficiais perenes e intermitentes, a vulnerabilidade seja alta, uma vez que atuam como recarga autogênica e pontual. Na parte leste, onde está a principal rota do hidrossistema, a recarga é preferencialmente autogênica, representada tanto pela captura subterrânea do córrego da Mina (IP1), quanto pontualmente pelas dolinas e entrada de cavernas, sendo que a infiltração é via fraturas/falhas subverticais até atingir a zona saturada do aquífero (Fig. 6). As surgências da Angolinha e do SAAE, que constituem as principais zonas de descargas do hidrossistema, estão próximas à margem esquerda do rio São Miguel e são classificadas como uma surgência de fluxo ascendente, provavelmente ocasionada pelos "loops". Vale destacar que a surgência do SAAE constitui um importante ponto de captação de água usada para o abastecimento público de Pains, são áreas de alta vulnerabilidade como constatado pelo método EPIK e por Camaduro *et al.* (2007).

Os padrões geométricos das BTCs, apresentando vários picos de concentração (multipico) indicam a presença de condutos anastomosados (bypass), que dividem o fluxo em mais de

located at the lower level of the cave, as confirmed by the tracer tests.

*In the western and central part of the hydrosystem, recharge occurs in a diffuse and allogenic way, through the soil and the poorly developed epikarst. In addition, there are punctual discharge zones that form smaller springs giving rise to surface drainages. Due to this characteristic, this region is considered to be of low and moderate vulnerability. Nevertheless, in the surroundings of the perennial and intermittent surface drainages, vulnerability is high, since they act as autogenic and punctual recharge. In the eastern part, where the main route of the hydrosystem is, recharge is preferably autogenic, represented both by the underground capture of the Mina stream (IP1), and punctually by the dolines and cave entrances, with infiltration via subvertical fractures/faults until it reaches the aquifer's saturated zone (Fig. 6). The Angolinha and SAAE springs, which are the main discharge zones in the hydrosystem, are close to the left bank of the São Miguel river and are classified as upward flow springs, probably caused by loops. It is worth noting that the SAAE spring is an important water collection point used for the public supply of Pains, and these are areas of high vulnerability as verified by the EPIK method and by Camaduro *et al.* (2007).*

The several concentration peaks (multi-peak) showed in the BTCs geometric pattern, indicate the presence of anastomosed conduits (bypass), which divide the flow into more than one path (multi-flow) that meets again before exiting the system. This type of structure can occur both in plan and in cross-section (Ford & Williams, 2007), with anastomosed cave patterns being common when a stream seeps through a sinkhole (Palmer, 2007). In addition, associated with the multi-peak pattern, there is the characteristic extended tail indicating the existence of some underground lakes (Field &

uma trajetória (multifluxo), mas que se encontram novamente antes da saída do sistema. Esse tipo de estrutura pode ocorrer tanto em planta quanto em seção transversal (Ford & Williams, 2007), onde padrões de cavernas anastomosados são comuns quando um córrego infiltra por um sumidouro (Palmer, 2007). Além disso, associado ao padrão de multipico, existe a característica de cauda prolongada indicando a existência de alguns lagos subterrâneos (Field & Pinsky, 2000). Essa hipótese é corroborada pela análise das BTCs, onde o ponto SP2 (jusante) apresenta uma recuperação menor do que no ponto SP1 (montante) (Fig. 6), evidenciando o desvio do traçador antes de SP1 e depois a recuperação em SP2, tanto na seca quanto na chuva. Esse padrão de multifluxo pode aumentar a dispersão de um possível contaminante aumentando a vulnerabilidade do sistema.

Com relação aos parâmetros de fluxo (v_m e D_L) ao longo dos trechos da rota, há uma diminuição das velocidades médias do fluxo explicado pela diminuição do gradiente hidráulico e um aumento progressivo da dispersão longitudinal, devido ao aumento da distância entre o ponto de injeção (IP1) e o ponto de descarga (SP3). Há um aumento destes parâmetros durante a chuva, relacionado ao aumento das vazões, indicando que o sistema é hidrodinamicamente dependente das variações sazonais. Ademais, existe um aumento pequeno de vazão entre os trechos da rota que indica a existência de canais distributários que contribuem com um pequeno aumento do fluxo (inflow), como demonstrado pela contribuição extra da região do Timburé (Ferrari *et al.*, 2017). As altas velocidades de fluxo, de concentrações de pico e de taxas de recuperação dos traçadores, principalmente durante as chuvas, são fatores determi-

Pinsky, 2000). This hypothesis is corroborated by the analysis of the BTCs, where point SP2 (downstream) shows a lower recovery than point SP1 (upstream) (Fig. 6), showing the detour of the tracer before SP1 and then the recovery in SP2, both in dry and rainy season. This multi-flow pattern can increase the dispersion of a possible contaminant, increasing the system's vulnerability.

*With regard to the flow parameters (v_m and D_L) along the sections of the route, there is a decrease in the mean flow velocities explained by the decrease in the hydraulic gradient and a progressive increase in longitudinal dispersion, due to the increase in the distance between the injection point (IP1) and the discharge point (SP3). There is an increase in these parameters during rainfall, related to the increase in flows, indicating that the system is hydrodynamically dependent on seasonal variations. In addition, there is a small increase in flow between sections of the route, which indicates the existence of distributary channels that contribute to a small increase in flow (inflow), as demonstrated by the extra contribution from the Timburé region (Ferrari *et al.*, 2017). The high flow velocities, peak concentrations and recovery rates of tracers, especially during rainfall, are determining factors for an increase in the contamination vulnerability of groundwater and, for this reason, seasonal variations must be taken into account (Fig. 7).*

nantes para um aumento da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação e, por isso, as variações sazonais devem ser levadas em consideração (Fig. 7).

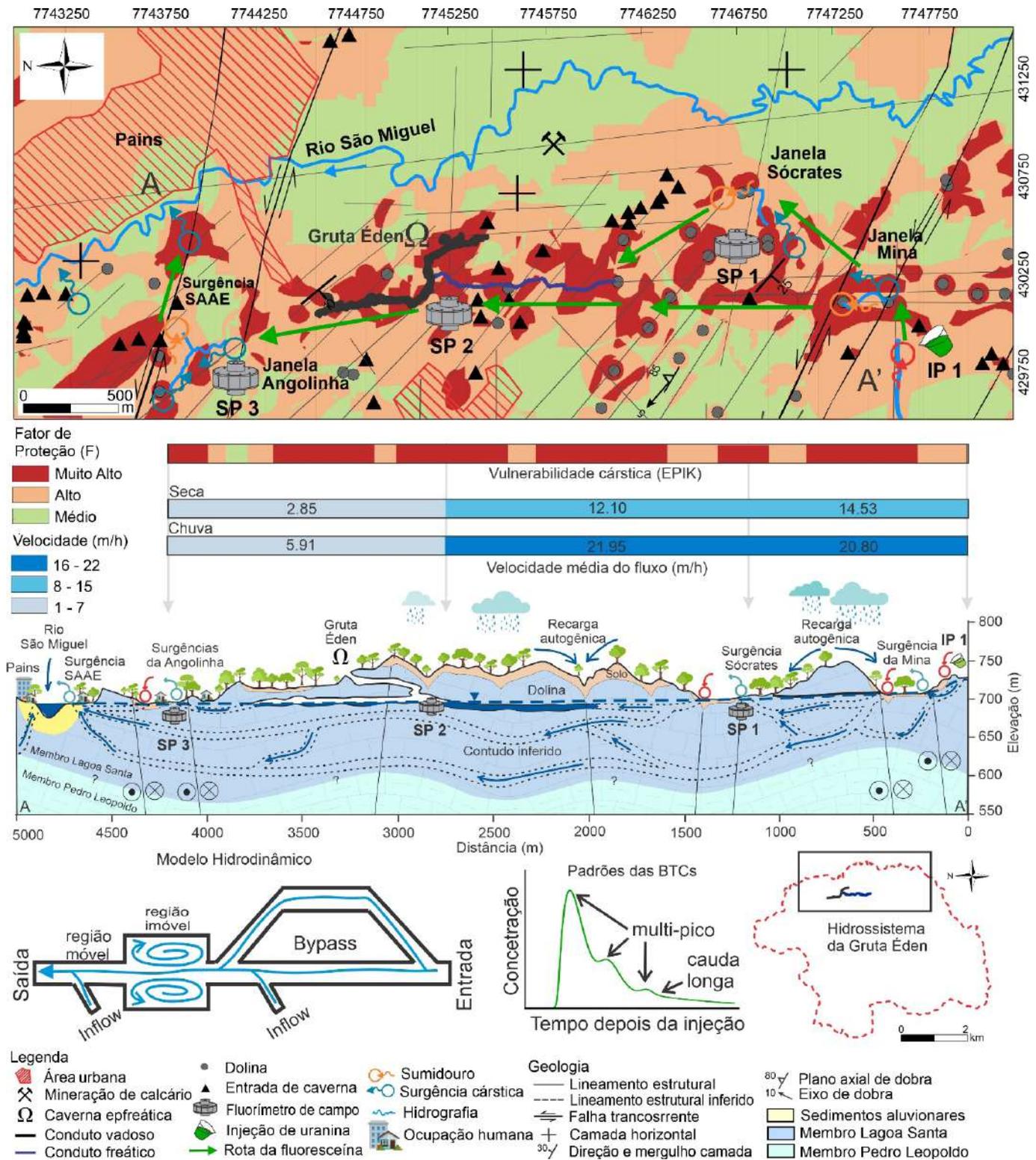


Figura 7 – Modelo hidrodinâmico e sua relação com a vulnerabilidade cárstica da principal rota do sistema cárstico da Gruta Éden. A seção hidrogeológica mostra a variação espacial e sazonal da velocidade média (vm) e da variação espacial da vulnerabilidade ao longo da rota.

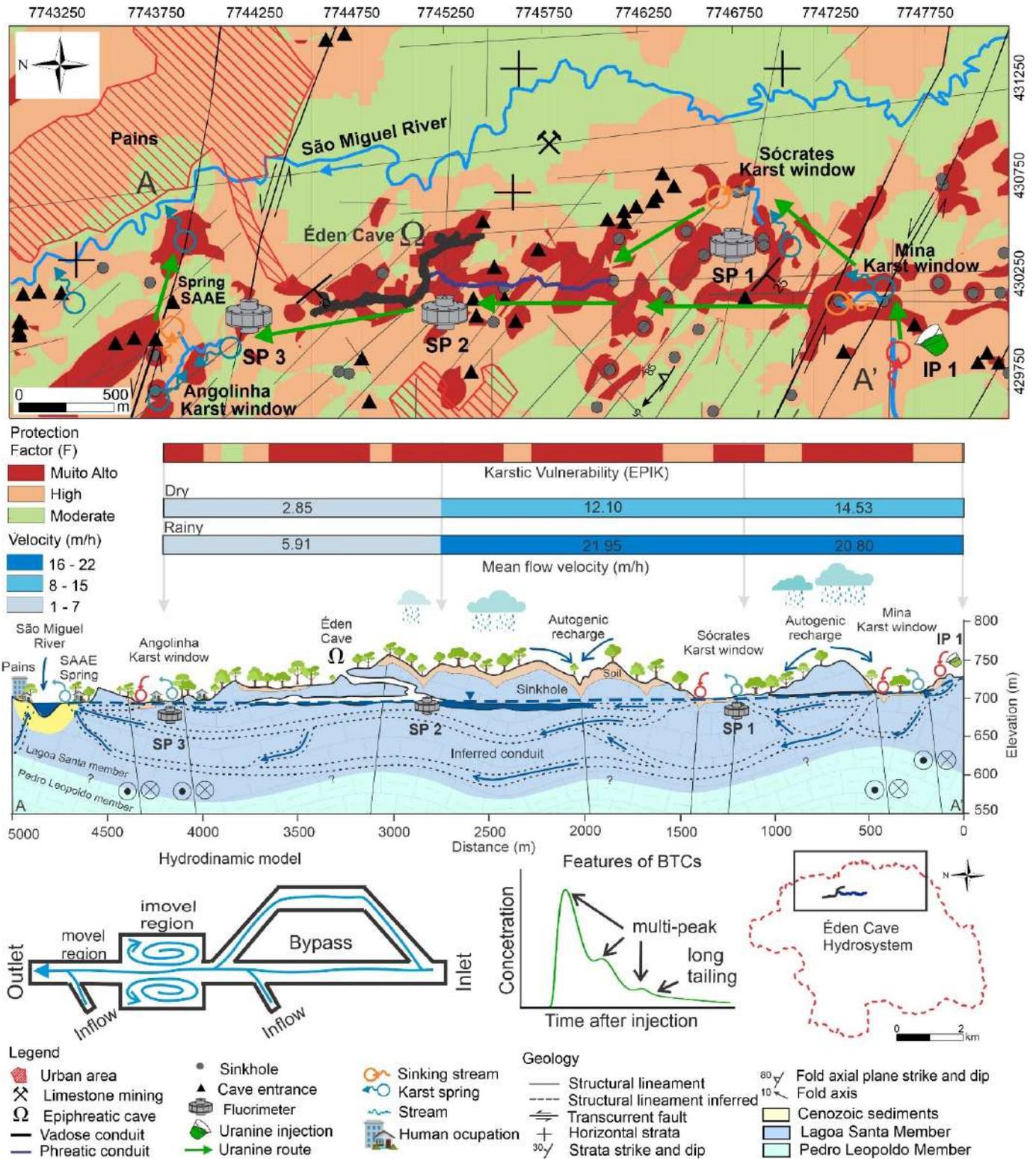


Figure 7 - Hydrodynamic model and its relationship with the karst vulnerability of the main route of the Éden Cave karst system. The hydrogeological section shows the spatial and seasonal variation in mean flow velocity (v_m) and the spatial variation in vulnerability along the route.

Zoneamento e medidas de proteção ambiental

Um dos objetivos deste trabalho é propor a definição de algumas medidas de proteção ambiental sustentadas pelas evidências e resultados dos métodos aplicados e a realidade socioeconômica local. Nesse sentido, são definidas quatro zonas de proteção (S1, S2, S3 e S4) dentro dos limites do hidrossistema da Gruta Éden (Fig. 8). As zonas S1 e S2 estão relacionadas às áreas de muito alta e alta vulnerabilidade, que inclui a principal rota e a área de influência direta da Gruta Éden. Essas duas zonas foram agrupadas por apresentarem uma maior fragilidade ambiental. A zona S3 está associada às áreas de moderada vulnerabilidade. Embora elas apresentem uma fragilidade menor do que a S1 e S2, há potenciais atividades antrópicas que aumentam o risco de contaminação ou impactos ambientais ao hidrossistema. A zona S4 está ligada às áreas de baixa vulnerabilidade. Mesmo apresentando potenciais atividades antrópicas, trata-se de uma zona com um maior fator intrínseco de proteção, contribuindo para amenizar impactos e atenuação de possíveis contaminantes. De acordo com essas quatro zonas, são apresentadas, a seguir, duas possíveis medidas de proteção ambiental:

1) Zonas de proteção S1 e S2: consideradas críticas, requer alta proteção e prioridade na proteção ambiental. Um possível poluente pode atingir rapidamente o ponto de abastecimento SAAE entre 3 e 6 dias. As restrições de uso da terra devem ser rígidas e requerem vigilância especial das atividades que poderiam reduzir a proteção natural do aquífero (remoção de camadas de solo ou alterando a espessura insaturada) ou se tornar uma fonte de poluição (perigo), como calcinações, mineração de calcário, depósitos

Zoning and environmental protection measures

One of the objectives of this work was to propose some environmental protection measures based on the evidence and results of the applied methods and the local socio-economic reality. To this end, four protection zones (S1, S2, S3 and S4) were defined within the boundaries of the Éden Cave hydrosystem (Fig. 8). Zones S1 and S2 are related to the areas of very high and high vulnerability, which include the main route and the Éden Cave direct influence area. These two zones were grouped together due to their greater environmental fragility. Zone S3 is associated with areas of moderate vulnerability. Although they are less fragile than S1 and S2, there are potential human activities that increase the risk of contamination or environmental impacts on the hydrosystem. Zone S4 is linked to areas of low vulnerability. Even though it has potential anthropogenic activities, it is a zone with a greater intrinsic protection factor, helping to mitigate impacts and attenuate possible contaminants. According to these four zones, two possible environmental protection measures are presented below:

1) Protection zones S1 and S2: considered critical, they require high protection and priority in environmental protection. A possible pollutant can quickly reach the SAAE supply point within 3 to 6 days. Land use restrictions must be strict and require special surveillance of activities that could reduce the natural protection of the aquifer (removal of soil layers or altering the unsaturated thickness) or become a source of pollution (danger), such as calcining, limestone mining, solid waste deposits and gas stations (Camaduro et al., 2007). Considering the local socio-economic reality, it is proposed to create environmental protection areas, such as a Private Natural Heritage Reserve

de resíduos sólidos e postos de combustíveis (Camaduro *et al.*, 2007). Considerando a realidade socioeconômica local, propõe-se a criação de áreas de proteção ambiental, como Reserva Particular Patrimônio Natural (RPPN) (Decreto nº 1922/1996) ou de um Parque Municipal na área de influência direta (rota principal) da Gruta Éden. Além disso, deve ser dada atenção à coleta de esgoto e saneamento básico do distrito da Mina, que influencia diretamente o córrego da Mina. Sugere-se um trabalho de educação ambiental para a conscientização dos proprietários de terras que abrange essas zonas. Recomenda-se ao Plano Diretor da cidade de Pains que não haja expansão da malha urbana sobre essas zonas.

2) Zonas de proteção S3 e S4: nestas áreas é possível desenvolver atividades humanas sem impacto direto no hidrossistema, o que condiz com a capacidade de atenuação de impactos do aquífero. São áreas onde são permitidas a ocupação humana e atividade industrial, embora recomende-se sempre a atenção do poder público nas atividades antrópicas estabelecidas nestas zonas.

(Reserva Particular Patrimônio Natural - RPPN) (Decree No. 1922/1996) or a Municipal Park in the Éden Cave direct influence area. Attention should also be paid to sewage collection and basic sanitation in the Mina district, which directly influences the Mina stream. Environmental education work is suggested to raise awareness among landowners in these areas. The Pains Master Plan recommends that the urban fabric should not be expanded over these areas.

2) Protection zones S3 and S4: in these areas it is possible to carry out human activities without direct impacts in the hydrosystem, which is in line with the aquifer's ability to mitigate impacts. These are areas where human occupation and industrial activity are permitted, although it is always recommended that the public authorities pay close attention to the anthropogenic activities established in these zones.

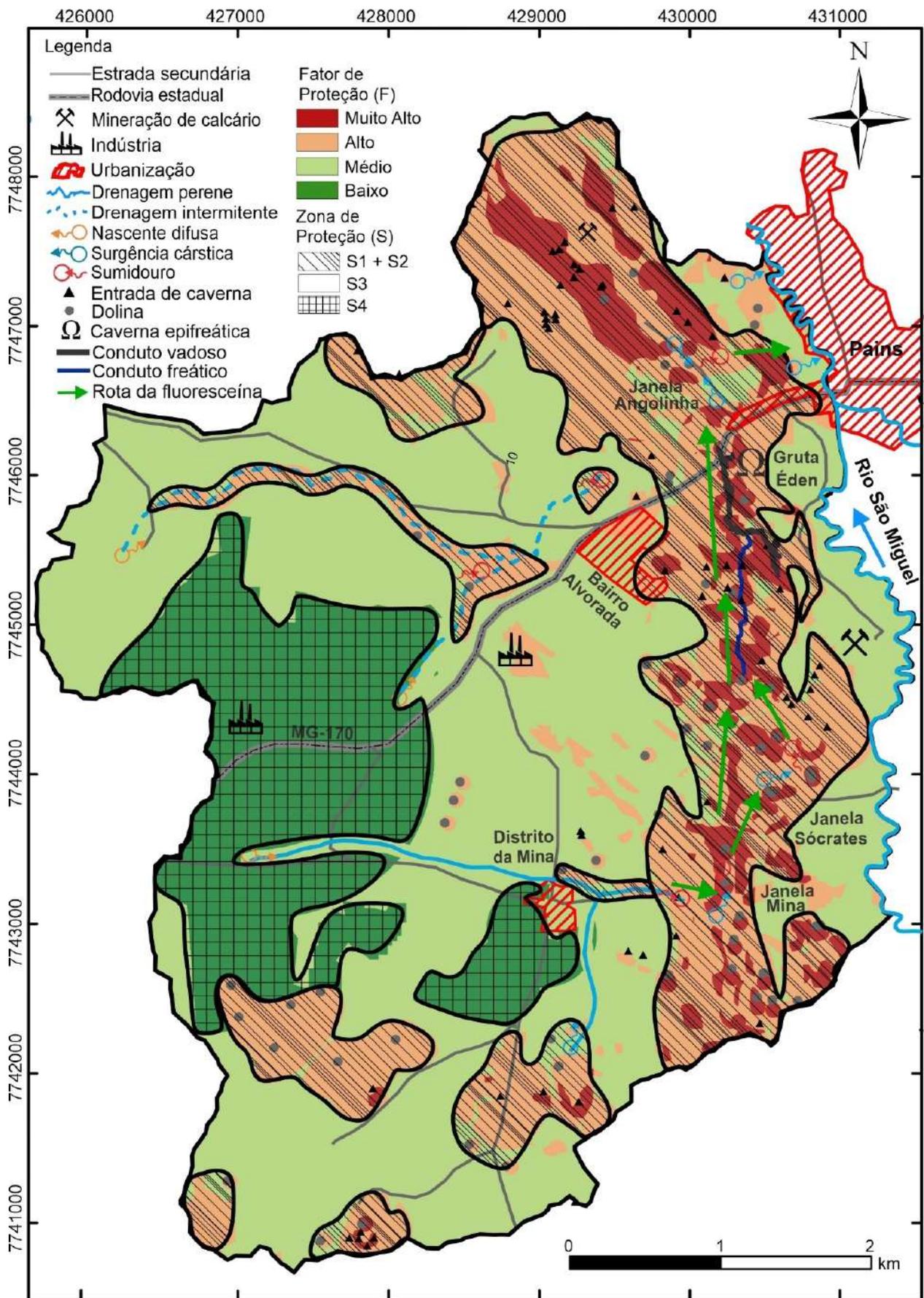


Figura 8 - Zoneamento de proteção do hidrossistema da Gruta Éden proposto com base no mapeamento de vulnerabilidade cárstica à contaminação e pelos testes de traçadores corante.

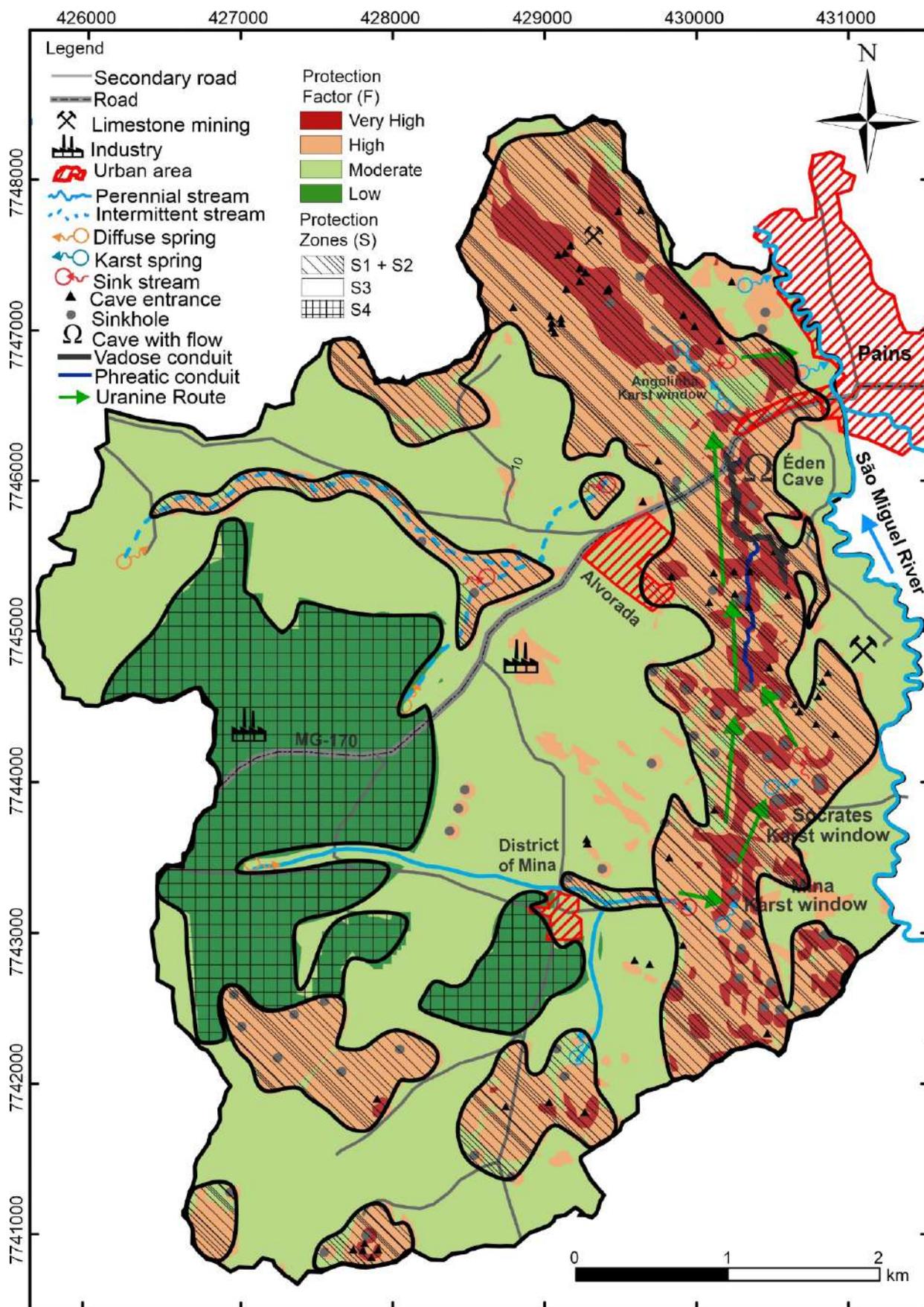


Figure 8 – Protection zoning for the Éden Cave hydrosystem proposed based on karst vulnerability mapping and dye tracer tests.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrossistema da Gruta Édén é complexo tanto do ponto de vista geológico-estrutural quanto hidrodinamicamente devido ao grau de fraturamento/dobramento e deformação tectônica, onde a ação da água e espeleogênese gerou heterogeneidades, como condutos anastomosados, *loops*, lagos subterrâneos, além da maior sinuosidade dos condutos. As heterogeneidades do aquífero refletem diretamente nos padrões geométricos das curvas de restituição e dos parâmetros de fluxo. Os *bypass* ocasionam multifluxos modificando padrões das curvas com vários picos de concentração. A combinação entre lagos subterrâneos e *bypass* aumenta a interação entre zonas móveis e imóveis do fluxo, promovendo um padrão de cauda prolongada das curvas.

A hidrodinâmica do sistema é sensível às variações sazonais climáticas e hidrológicas, constatado pela influência dos parâmetros das curvas e de fluxo com o aumento das vazões durante a estação chuvosa. A recarga predominante é autogênica, via dolinas e sumidouros. Em algumas áreas, a recarga é alogênica e difusa pelo solo e epicarste pouco desenvolvido. A descarga é perene e com fluxo ascendente devido aos padrões de *loops*, sendo que as principais surgências são utilizadas como pontos de abastecimento público.

As áreas de maiores vulnerabilidades deste hidrossistema estão relacionadas com um carste mais desenvolvido e aflorante. As áreas de menores vulnerabilidades estão associadas com um carste menos desenvolvido e de maior cobertura de proteção. Deve-se considerar as variações sazonais dos parâmetros do fluxo durante o mapeamento da vulnerabilidade, uma

CONCLUSIONS

The Édén Cave hydrosystem is complex from both a geological-structural and hydrodynamic point of view due to the degree of fracturing/folding and tectonic deformation. The action of water and speleogenesis has generated heterogeneities such as anastomosed conduits, loops, underground lakes, as well as the greater sinuosity of the conduits. The heterogeneities of the aquifer are directly reflected in the geometric patterns of the breakthrough curves and flow parameters. Bypasses cause multi-flows, modifying curve patterns with several concentration peaks. The combination of underground lakes and bypasses increases the interaction between mobile and immobile flow zones, promoting an extended tailing pattern in the curves.

The system hydrodynamics are sensitive to seasonal climatic and hydrological variations, as can be seen by the influence of the curve and flow parameters with the increase in flows during the rainy season. The predominant recharge is autogenic, via dolines and sinkholes. In some areas, recharge is allogenic and diffuse through the soil and poorly developed epikarst. Discharge is perennial and upward-flowing due to loop patterns, with the main springs being used as public supply points.

The hydrosystem most vulnerable areas are related to more developed and outcropping karst. The areas of lower vulnerability are associated with less developed karst and greater protection coverage. Seasonal variations in flow parameters should be taken into account when mapping vulnerability, since the high dynamics of this hydrosystem have been demonstrated.

Four protection zones were defined: S1 and S2, related to areas of very high and high vulnerability, directly influenced by Édén Cave; S3, asso-

vez que foi demonstrada a alta dinâmica deste hidrossistema.

Quatro zonas de proteção foram definidas: S1 e S2, relacionadas às áreas de muito alta e alta vulnerabilidades, de influência direta da Gruta Éden; S3, associada às áreas de moderada vulnerabilidade; e S4, ligada às de baixa vulnerabilidade. Duas medidas de proteção ambiental são sugeridas: zonas S1 e S2, mais restritivas e de prioridades à proteção ambiental; e zonas S3 e S4, podendo desenvolver atividades humanas sem impacto direto no hidrossistema.

A associação do mapeamento da vulnerabilidade cárstica pelo método EPIK (adaptado) com os testes de traçadores fluorescentes e o mapeamento das feições geomorfológicas e estruturais demonstraram ser uma ferramenta eficaz para compreender a hidrodinâmica e a vulnerabilidade de sistemas complexos. Os produtos gerados podem contribuir para uma melhor gestão ambiental dos recursos hídricos e do patrimônio espeleológico em área cársticas, como é o caso da cidade de Pains.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências e ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) da UFMG, aos espeleólogos da Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), ao Espeleogrupo Pains (EPA) em especial ao Lucélio Nativo pelas contribuições relevantes, ao Guano Speleo pela topografia da Gruta Éden, ao Celso Constâncio pela topografia de *drone*, à Coordenação de Aperfeiçoa-

ciated with areas of moderate vulnerability; and S4, linked to areas of low vulnerability. Two environmental protection measures are suggested: zones S1 and S2, which are more restrictive and prioritize environmental protection; and zones S3 and S4, which can develop human activities with no direct impact on the hydrosystem.

The combination of karst vulnerability mapping using the EPIK method (adapted) with fluorescent tracer tests and the mapping of geomorphological and structural features proved to be an effective tool for understanding the hydrodynamics and vulnerability of complex systems. The products generated can contribute to better environmental management of water resources and speleological heritage in karst areas, such as the city of Pains.

ACKNOWLEDGEMENTS

Special thanks to the Graduate Program in Crustal Evolution and Natural Resources of the Federal University of Ouro Preto, the Graduate Program in Geology of the Institute of Geosciences and the Laboratory of Hydrogeological Studies (Laboratório de Estudos Hidrogeológicos - LEHID) of UFMG, the speleologists of the Excursionist and Speleological Society (Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE), the Espeleogrupo Pains (EPA), especially Lucélio Nativo for his relevant contributions, Guano Speleo for the Éden Cave topography, Celso Constâncio for the drone topography, the Coordi-

mento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) (Processo nº 02667.000006/2013-00).

nation for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), the National Center for Cave Research and Conservation (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav) (Process no. 02667. 000006/2013-00).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A. Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. *Bacia do São Francisco Geologia e Recursos Naturais*, Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 9-30.

BARBERÁ, J. A.; MUDARRA, M.; ANDREO, B.; DE LA TORRE, B. Regional-scale analysis of karst underground flow deduced from tracing experiments: examples from carbonate aquifers in Malaga province, southern Spain. *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 1, p. 23-40, 2018.

BENISCHKE, R.; GOLDSCHIEDER, N.; SMART, C. Tracer techniques. In: GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in karst hydrogeology*. London: Taylor and Francis, p. 147-170, 2007.

BENISCHKE, R. Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n.1, p. 67-88, 2021.

CADAMURO, L. M. Relatório de Avaliação Qualitativa de Interferências Físicas (Exploração de Água para Consumo Humano, Mineração, Irrigação) na Região da Área da Bacia do São Francisco. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis, Diretoria de Ecossistemas – Direc, Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas – CECAV, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – Pnud, 45 p. 2007.

DIAS, F. S.; VELÁSQUES, L. N. Hidrogeologia da bacia do rio São Miguel, municípios de Pains e Arcos – MG. In: XII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas, 2002. *Anais do XII Congresso Brasileiro de águas subterrâneas*, 2002, v. 1. p. 1-20.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide. Swiss Agency for the Environment. Berne: *Forests and Landscape (SAEFL)*. 1998.

ENDER, A.; GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N. Spatial resolution of transport parameters in a subtropical karst conduit system during dry and wet seasons. *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 7, p. 2241-2255, 2018.

FÉLIX, A. A.; FREITAS JÚNIOR, R. L. *Mapeamento geológico e hidrogeológico da bacia hidrográfica do rio São Miguel – Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais*. 2000. 105 f. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

FERRARI J. A., RIBEIRO, A. A., FERREIRA C. F., CRUZ J. B., REINO J. C. R., PILÓ L. B. *Identificação e Caracterização Hidrológica da Área de Influência da Gruta Do Éden - Pains - MG*. Relatório Técnico, São Paulo, 2018.

FERREIRA, C. F. Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas. In: *Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. Brasília-DF, 70p, 2019.

FIELD, M. S. *The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems*. National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2002.

FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. McMaster University, Canadá; University of Auckland, New Zealand. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, v. 1, 2007.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environments agencies. Washington: *The Word Bank*, 2002.

FREITAS, P. M. C. *Estudo de interconexão hidráulica superficial-subterrânea no carste da área periurbana de Pains/MG, utilizando-se traçadores Rodamina WT*. 2009. 101 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2009.

GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N.; BERKOWITZ, B. Experimental and modeling evidence of kilometer-scale anomalous tracer transport in an alpine karst aquifer. *Water Research*, v. 178, p. 115755, 2020.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis. International Contributions to Hydrogeology, 2007.

GOLDSCHIEDER, N. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany. *Hydrogeology Journal*, v. 16, n. 7, p. 1311-1317, 2008.

GOLDSCHIEDER, N. *et al.* Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.

GOLDSCHIEDER, N. *Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems - Examples from the Northern Alps and Swabian Alp*. PhD thesis, 2002. 229 f. University of Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.

GOLDSCHIEDER, N. 2005. Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98(1), 1-17.

GUTIÉRREZ F, PARISE M, DE WAELE J; JOURDE H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth Science Reviews*, v. 138, p. 61-88, 2014.

KLIMCHOUK, A. B. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, v. 44, n. 3, p. 289-313, 2015.

LAUBER, U.; UFRICHT, W.; GOLDSCHIEDER, N. Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 2, p. 435-445, 2014.

LEIBUNDGUT, A. C.; MALOSZEWSKI, P.; KÜLLS, C. *Tracers in hydrology*. Wiley-Blackwell, 2009.

LENHARE, B. D. *Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos Rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio Paranapanema) e do Rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape) na região do Parque Estadual Intervales (PEI), Estado de São Paulo*. 2014. 113f. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2014.

LUCON, T. N. *et al.* Recharge sources and hydraulic communication a karst aquifer, São Miguel watershed, MG, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 100, p. 102591, 2020.

LUCON, T. N.; GALVÃO, P. H. F.; COSTA, A. T. Hidrogeologia. In: CRUZ & PILÓ. *A região cárstica de Pains*. Brasília: Editora, 2022. cap. 2, p. 53-79.

MARÍN, A. I.; ANDREO, B.; MUDARRA, M. Vulnerability mapping and protection zoning of karst springs. Validation by multitracer tests. *Science of the Total Environment*, v. 532, p. 435-446, 2015.

MELO, D. H. C. *Mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos Cársticos: Exemplos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verdes, Jacaré e Salitre, Bahia, Brasil*. 2017. 104 f. Tese de doutorado, PGgeologia. Universidade Federal da Bahia, 2017.

MENEGASSE, L. N; GONÇALVES, J. M; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na provincial cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Revista águas subterrâneas*, n. 9, p.1-10, 2002.

MEYER, B. O. *Petrologia e geocronologia das fácies carbonáticas da Formação Sete Lagoas em Pains (MG)*. 2018. 256 f. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, 2018.

MORALES, T. *et al.* Solute transport modelling in karst conduits with slow zones during different hydrologic conditions. *Journal of Hydrology*, v. 390, n. 3-4, p. 182-189, 2010.

MUZZI MAGALHÃES, P. *Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco*. 1989. 100 f. Dissertação Mestrado Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Ouro Preto, 1989.

PALMER, A. N. *Cave Geology*, Cave Books, Dayton, 2007.

- PEREIRA, D. L.; GALVÃO, P.; LUCON, T.; FUJACO, M. A. Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro (geo) logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191-203, 2019.
- PILÓ, L. B. Ambientes Cársticos de Minas Gerais: valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. *Revista O Carste*, Belo Horizonte, v. 11, n. 3, p. 50-58, 1999.
- RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; SENRA, A. S.; VALERIANO, C. D. M. *Geologia da Folha Piumhi- SF.23-V-B-II, escala 1:100.000*: nota explicativa. Minas Gerais: UFRJ/CPRM, 50p. Santos, I. 2001. Hidrometria aplicada, capítulo 4. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, p. 119-124, 2008.
- RIBEIRO, D. D. M, NASCIMENTO, S. A. M.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. *Águas Subterrâneas*, v. 30, n. 3, p. 375-393, 2016.
- RUBBIOLI, E., AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R. *Cavernas-Atlas do Brasil Subterrâneo*. Brasília, ICMBio/CECAV. 370p. 2019
- SAADI, A.; MORAIS, M. S.; CARDOSO, G. G. C. *Evolução Morfotectônica e Carstogênese na região de Arcos-Pains-Doresópolis*. In: 2º Simpósio Nacional de Geomorfologia. Florianópolis, 1998.
- SCHNEGG, P. A. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: *Articles of the Geomagnetism Group at the University of Neuchâtel, Groundwater and Human Development*. Neuchâtel. p. 1484-1488, 2002.
- SEE - Sociedade Excursionista e Espeleológica. *Projeto Arcos Pains Espeleologia (PROAPE)*: SEE/DEGEO/EM/UFOP. Ouro Preto: PROAPE, 2012.
- SMART, C. Error and technique in fluorescent dye tracing. In: *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, p. 500-512, 2005.
- STEVANOVIĆ, Z. Characterization of karst aquifer. In: *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Springer, Cham. p. 47-125, 2015.
- TIMO, M. B. Caracterização geomorfológica da região cárstica Arcos-Pains e de seus sistemas cársticos. *Caderno de Geografia*, 32(68), 191-191, 2022.
- VALERIANO, C. M. The Southern Brasília Belt. In São Francisco Craton, Eastern Brazil, Tectonic genealogy of a miniature continent. In: HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F.; REIS, H. L. *The São Francisco craton and its margins*. Springer, Cham. p. 321-331, 2019.
- WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, v. 5, p. 11-16, 2003.

WORTHINGTON, S. R. H.; FORD, D. C. Self organized permeability in carbonate aquifers. *Groundwater*, v. 47, n. 3, p. 326-336, 2009.

YOUNOS, T.; SCHREIBER, M.; FICCO, K. K. *Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy*. Springer. v. 68, 2018, 273p.

ZWAHLEN, F. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers - Final report -, COST Action 620. Luxemburg, 2004.

VIESES NO CONHECIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE CAVERNAS DO BRASIL

BIASES IN THE KNOWLEDGE OF THE GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL

Rodrigo Antônio Castro-Souza

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: rodrigodesouzaac@gmail.com

Nicolas Silva Bosco

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: n.bosco.ambiente@gmail.com

Thadeu Sobral-Souza

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: thadeusobral@gmail.com

RESUMO

Muitas cavernas ainda não foram descobertas e/ou mapeadas no Brasil. Diversos fatores socioeconômicos e de acessibilidade podem ser responsáveis por enviesar o conhecimento da distribuição geográfica das cavernas brasileiras. Aqui, usando técnicas de modelagem bayesiana, nós predizemos que o conhecimento sobre a distribuição geográfica de cavernas do Brasil é fortemente enviesado para locais próximos de centros urbanos e das atividades de mineração, ou seja, conhece-se mais cavernas próximas a ambientes de mineração e/ou de locais mais acessíveis do que longe destes. Nossos modelos foram construídos associando os dados de ocorrência conhecidas de cavernas digitalmente

ABSTRACT

Many caves have yet to be discovered and/or mapped in Brazil. Various socio-economic and accessibility factors may be responsible for biasing the knowledge of Brazilian caves geographical distribution. In this study, using Bayesian modeling techniques, it was predicted that knowledge about the Brazilian caves geographic distribution is strongly biased towards locations close to urban centers and mining activities. More caves are known near mining environments and/or more accessible locations than far from them for instance. The models were built by associating the known occurrence data of digitally accessible caves in the Speleological Information National Register (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)

acessíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), com diferentes variáveis de acessibilidade e infraestrutura. Nossas descobertas sugerem que as regiões com maior ocorrência de cavernas conhecidas se concentram principalmente dentro dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará e Piauí, enquanto alguns estados brasileiros, como Amazonas, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Maranhão ainda são sub explorados, ou seja, apresentam grandes lacunas e alto potencial para descobertas de novas cavernas. Concluimos que a exploração econômica tem gerado um conhecimento enviesado acerca da distribuição de cavernas, o que pode estar ligado aos embates históricos entre nossa legislação de exploração vs. conservação, tornando-se imprescindível que novas políticas sobre a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro considerem toda a paisagem espeleológica, seus vieses (locais mais bem estudados), lacunas Racovittzanas (locais menos estudados ou possivelmente negligenciados), e os processos socio-econômicos que implicam nestes.

PALAVRAS-CHAVE: patrimônio espeleológico, déficit racovittzan, desconhecimento, espeleologia.

INTRODUÇÃO

As cavernas compreendem cavidades naturais associadas a diferentes tipos de rocha (CECAV, 2022a). Normalmente, esses ambientes estão associados a uma formação rochosa conhecida como carste/pseudocarste que propiciam a ocorrência de processos químicos, físicos e biológicos de dissolução das rochas que as originam (Auler & Pilo, 2011; Travassos, 2019; Parker *et al.*, 2022). Devido à complexidade do processo erosivo e a

with different accessibility and infrastructure variables. The findings suggest that the regions with the highest occurrence of known caves are mainly concentrated within the states of Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará and Piauí. Meanwhile some Brazilian states, such as Amazonas, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná and Maranhão are still under-explored. They have large gaps and high potential for the discovery of new caves. In conclusion, the economic exploitation has generated biased knowledge about the distribution of caves. This may be linked to the historical clashes between exploitation and conservation legislation, making it essential that new policies on the conservation of Brazil's speleological heritage consider the entire speleological landscape, its biases (better studied sites), Racovitzan shortfalls (less studied or possibly neglected sites), and the socio-economic processes that imply these.

KEYWORDS: speleological heritage, racovitzan deficit, lack of knowledge, speleology.

INTRODUCTION

*Caves are natural underground environments associated with different types of rock (CECAV, 2022a). Normally, these environments are associated with a rock formation known as karst/pseudokarst, which enables the occurrence of chemical, physical and biological processes of dissolution of the rocks that originate them (Auler & Pilo, 2011; Travassos, 2019; Parker *et al.*, 2022). The caves have been considered laboratories for evolutionary studies*

grande constância temporal das cavernas elas têm sido consideradas laboratórios para estudos evolutivos da biodiversidade (Poulson & White, 1969; Mammola, 2019), templos religiosos (Price & Travassos, 2016); fonte de registros e vestígios arqueológicos (Damm & Young, 2013; Barra, 2020), paleontológicos (Burney *et al.*, 2022), antropológicos (Détroit *et al.*, 2019), paleoambientais (Novello *et al.*, 2017; Cruz & Piló, 2019), fonte de serviços ecossistêmicos (Mammola *et al.*, 2019a), e também utilizadas como fonte de informações sobre a saúde humana (Riddle *et al.*, 2018; Yoshizawa *et al.*, 2018), bem como locais para a prática de turismo, esportes e recreação.

Estima-se que há um grande número de cavernas ainda desconhecidas (Auler & Pilo, 2011; Jansen *et al.*, 2012; CECAV, 2022a), sendo parte dessa problemática, recentemente intitulada de lacuna Racovitzana, em homenagem ao naturalista Emil Racoviță (Ficetola *et al.*, 2019). Ela se refere especificamente ao conhecimento desigual sobre a distribuição espacial de cavernas que, consequentemente, afeta também a conservação delas (Ficetola *et al.*, 2019; Mammola *et al.*, 2019a). Nesse contexto, a urbanização, a fragmentação da paisagem, a poluição e a extração de minerais têm se destacado como fatores intensificadores de tensões nas áreas com ocorrência de cavernas, o que podem gerar impactos irreversíveis sobre essas paisagens, os ecossistemas associados e os serviços ecossistêmicos locais (Ferreira *et al.*, 2018; Mammola *et al.*, 2019a; Ferreira *et al.*, 2022; Mammola *et al.*, 2022) principalmente em regiões de carste/pseudocarste, onde ambientes cavernícolas são ainda desconhecidos.

A legislação brasileira exige que sejam apresentados relatórios de impacto ambiental para o desenvolvimento de empreendimentos e/

*of biodiversity (Poulson & White, 1969; Mammola, 2019), religious temples (Price & Travassos, 2016); a source of archaeological records and remains (Damm & Young, 2013; Barra, 2020), paleontological (Burney *et al.*, 2022), anthropological (Détroit *et al.*, 2019), paleoenvironmental (Novello *et al.*, 2017; Cruz & Piló, 2019), source of ecosystem services (Mammola *et al.*, 2019a), all due to the complexity of the erosion process and the great temporal constancy of caves. In addition, they are also used as a source of information on human health (Riddle *et al.*, 2018; Yoshizawa *et al.*, 2018), as well as sites for tourism, sports and recreation.*

*It is estimated that there are a large number of caves that are still unknown (Auler & Pilo, 2011; Jansen *et al.*, 2012; CECAV, 2022a). Part of this problem has recently been called the Racovitzan shortfall, in honor of the naturalist Emil Racoviță (Ficetola *et al.*, 2019). It refers specifically to the uneven knowledge about the spatial cave distribution, which consequently also affects their conservation (Ficetola *et al.*, 2019; Mammola *et al.*, 2019a). In that context, urbanization, landscape fragmentation, pollution and mineral extraction have stood out as tensions intensifying factors in areas where caves occur. This can generate irreversible impacts on these landscapes, associated ecosystems and local ecosystem services (Ferreira *et al.*, 2018; Mammola *et al.*, 2019a; Ferreira *et al.*, 2022; Mammola *et al.*, 2022), especially in karst/pseudokarst regions, where cave environments are still unknown.*

Brazilian legislation requires the submission of environmental impact reports for the development of projects and/or activities that may have an impact on natural areas (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b). In places with a high potential for caves (karst/pseudokarst), or in regions where there are known caves, a speleological prospection activity is required for the licensing in order to map the presence or

ou atividades que possam causar impactos em áreas naturais (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b). Para o licenciamento em locais com um grande potencial de ocorrência de cavernas (carste/pseudocarste), ou em regiões onde se têm cavernas conhecidas, é necessária uma atividade de prospecção espeleológica com a finalidade de mapear a presença ou não de novas cavernas na região. Em caso positivo, são realizados estudos multidisciplinares (ex., biológicos, geológicos e arqueológicos) para identificação dos níveis de relevância das cavidades (baixo, médio, alto e máximo), delimitação de áreas de influência e medidas de compensação ambiental, seguindo a legislação vigente acerca do patrimônio espeleológico brasileiro (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022b; Sion, 2022). Os estudos em ambientes cavernícolas têm alimentado um banco de dados online e acessível sobre as ocorrências conhecidas de cavernas em todo território nacional desde o ano de 2004, conforme exige a legislação brasileira (BRASIL, 2022c), no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Esse cadastro também engloba dados oriundos da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), literatura científica e levantamentos realizados pela equipe técnica do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) (CECAV 2022c).

Algumas regiões geográficas foram mais exploradas (amostradas) e, em função disso, possuem maior conhecimento sobre ocorrência de cavernas. Em outras palavras, isso resulta em um conhecimento denominado de enviesado ou tendencioso. As demandas ligadas ao desenvolvimento socioeconômico (ex., construção de hidrelétricas, estradas, ferrovias e atividades de mineração), e a maior acessibilidade dessas regiões (ex., proximidade

absence of new caves. If caves are found, multidisciplinary studies are carried out (e.g. biological, geological and archaeological) to identify the caves relevance levels (low, medium, high and maximum). The studies delimit areas of influence and environmental compensation measures, in accordance with current Brazilian speleological heritage legislation (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022b; Sion, 2022). Studies on cave environments have been feeding an online and accessible database on known cave occurrences throughout the country since 2004 in the CANIE, as required by Brazilian legislation (BRASIL, 2022c). This register also includes data from the Brazilian Speleological Society (Sociedade Brasileira de Espeleologia SBE), scientific literature and surveys carried out by the National Center for Cave Research and Conservation (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas CECAV) technical team (CECAV 2022c).

Some geographical regions have been more explored (sampled) and there is more knowledge about the cave occurrence as a result. In other words, this results in what is known as biased knowledge. The demands linked to socio-economic development (e.g. construction of hydroelectric dams, roads, railroads and mining activities), and the greater accessibility of these regions (e.g. proximity to roads, rivers and urban centers) generate biases in the knowledge of the geographical cave distribution. In a similar way that also happens with biodiversity distribution data (Botts et al., 2011; Yang et al., 2014; Meyer et al., 2015; Oliveira et al., 2016; Daru et al., 2018; Zizka et al., 2020). Many of the oversampled regions are home to a high cave abundance considering that current legislation requires the registration of caves in CANIE, due to environmental licensing (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022c). On the other hand, many caves may not yet have been disco-

dade de estradas, rios e centros urbanos) geram vieses no conhecimento da distribuição geográfica de cavernas, de forma similar ao que ocorre sobre os dados de distribuição da biodiversidade (Botts *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014; Meyer *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2016; Daru *et al.*, 2018; Zizka *et al.*, 2020). Considerando que a legislação atual exige o cadastramento das cavidades no CANIE, em virtude do licenciamento ambiental (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022c), muitas das regiões super amostradas abrigam elevada abundância de cavernas. Por outro lado, inúmeras cavidades ainda podem não ter sido descobertas devido à baixa demanda socioeconômica e/ou as dificuldades de acessibilidade. Logo, compreender os fatores associados aos vieses no conhecimento acerca da distribuição geográfica de cavernas é de grande valia, pois ajudaria a evitar conclusões tendenciosas sobre a distribuição das cavernas, além de detectar locais super e sub amostrados para direcionar novas pesquisas espeleológicas e, assim, favorecer a conservação de ambientes subterrâneos.

Aqui, nós testamos se o conhecimento digital acessível sobre a distribuição geográfica das cavernas do Brasil é enviesado para múltiplos fatores de acessibilidade e infraestrutura. Nós hipotetizamos que: (i) existe maior conhecimento da ocorrência de cavernas em locais mais acessíveis, isto é, próximo a centros urbanos, estradas, rios navegáveis e ferrovias; e (ii) existe maior conhecimento da ocorrência de cavernas próximo a locais de atividades econômicas de infraestrutura, como minerações, hidrelétricas e linhas de transmissão. Para testar tais hipóteses, construímos um modelo bayesiano que associa os dados de ocorrência de cavernas disponíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleo-

vered due to low socioeconomic demand and/or accessibility difficulties. Therefore, understanding the factors associated with biases in the geographical cave distribution knowledge is of great value. This would help to avoid biased conclusions about the cave distribution, as well as detecting over-and under-sampled sites to direct new speleological research and thus favor the conservation of underground environments.

In this study, it was tested whether accessible digital knowledge about the geographic Brazilian caves distribution is biased towards multiple factors of accessibility and infrastructure. Two hypothesis were created: (i) there is greater knowledge of the occurrence of caves in more accessible locations, i.e. near urban centers, roads, navigable rivers and railroads; and (ii) there is greater knowledge of the occurrence of caves near locations of economic infrastructure activities, such as mining, hydroelectric plants and transmission lines. To test these hypotheses, a Bayesian model that associates the cave occurrence data available in the Speleological Information National Register (CANIE) with potential accessibility and infrastructure factors responsible for the formation of biases in cave discovery was built.

lógicas (CANIE) com potenciais fatores de acessibilidade e infraestrutura responsáveis pela formação de vieses na descoberta de cavernas.

METODOLOGIA

Compilação dos Dados de Cavernas e Área de Estudo

Para caracterizar o conhecimento atual da distribuição geográfica das cavernas no Brasil (nossa variável resposta), nós construímos um banco de dados baseado nos registros de cavidades do *Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)*, totalizando 23.117 registros de cavernas conhecidas (CECAV, 2022c) (Figura 1a). Para representar nossa área de estudo (limite de ocorrência de locais com possibilidade de ocorrência de caverna), nós utilizamos o *Mapa de Áreas de Ocorrências de Cavernas no Brasil*, representando diferentes tipos de rochas potenciais onde pode haver cavidades subterrâneas naturais (CECAV, 2022d). Nesse sentido, filtramos somente as cavidades que estavam inseridas dentro das áreas de ocorrência de cavernas, totalizando assim 22.159 registros (Figura 1b).

Não levamos em consideração a potencialidade de ocorrência das cavernas, uma vez que o material mais abrangente e atualizado para acessar essas informações (*Mapa de Áreas de Ocorrências de Cavernas no Brasil*) apresenta uma resolução espacial grosseira para os padrões atuais (Amani *et al.*, 2020), estando na escala de: 1:7.000.000. No entanto, ficaríamos satisfeitos em ajustar nossa abordagem em estudos futuros, especialmente considerando que o ICMBio/Cecav tem atualizado sua base de dados periodicamente.

METHODOLOGY

Cave and Study Area Data Compilation

A database based on the cave records in the Speleological Information National Register (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE), totaling 23,117 known cave records (CECAV, 2022c) (Figure 1a) was built to characterize the current knowledge of the geographical cave distribution in Brazil (the response variable). The Map of Cave Occurrence Areas in Brazil was used to represent the study area (limit of occurrence of sites with the possibility of cave occurrence). It represents different types of potential rocks where there may be natural underground caves (CECAV, 2022d). In that regard, only the caves that were within the areas of cave occurrence were filtered out, thus totaling 22,159 records (Figure 1b).

*The potential cave occurrence was not taken into account, since the most comprehensive and up-to-date material for accessing this information (Map of Cave Occurrence Areas in Brazil) has a coarse spatial resolution by today's standards (Amani *et al.*, 2020), being at 1:7.000.000 scale. However, the approach would be happily adjusted in future studies, especially considering that ICMBio/CECAV has been periodically updating its database.*

Fatores de Acessibilidade e Infraestrutura

Para representar os fatores de acessibilidade com potencial relação com o viés no conhecimento da distribuição geográfica de cavernas no Brasil (1ª hipótese), nós utilizamos as informações de: (i) distância de centros urbanos (km); (ii) distância de estradas (rodovias federais, estaduais e outras estradas) (km); (iii) distância de ferrovias (km); (iv) e distância de rios navegáveis (km) (hidrovias, rios de médio porte e lagos). Todos os fatores estavam inicialmente disponíveis no formato de camadas 'shapefile' (EMBRAPA, 2022; Map Biomas, 2022a; Map Biomas, 2022b; Natural Earth, 2022, respectivamente) (Figura 1c) que foram base para a construção de um arquivo 'raster' que continham nos 'grids' os valores de distância euclidiana em metros.

No caso dos fatores de infraestrutura potencialmente relacionados ao viés geográfico da distribuição de cavernas brasileiras (2ª hipótese), nós utilizamos os dados da plataforma Map Biomas, também em formato 'shapefile' *a priori*, sendo estes: (v) minas de produtos metálicos (Ferro, Cobre, Alumínio, Ouro entre outros); (vi) minas de produtos energéticos (carvão mineral, Urânio, gás Natural e petróleo); (vii) minas de outros produtos (Calcário, Fósforo, Grafita, Silício entre outros); (viii) usinas hidrelétricas; (ix) pequenas centrais hidrelétricas (PCHs); (x) linhas de transmissão (Map Biomas, 2022c, Map Biomas, 2022d, Map Biomas, 2022e, Map Biomas, 2022f, Map Biomas, 2022g, Map Biomas, 2022h, respectivamente) (Figura 1c).

Vale destacar que as informações disponíveis no MapBiomas representam um compilado de informações de diferentes órgãos, como IBGE,

Accessibility and Infrastructure Factors

Information on: (i) distance from urban centers (km); (ii) distance from roads (federal highways, state highways and other roads) (km); (iii) distance from railroads (km); (iv) and distance from navigable rivers (km) (waterways, medium-sized rivers and lakes) was used to represent the accessibility factors with a potential relationship to bias in the knowledge of the geographic cave distribution in Brazil (1st hypothesis). All the factors were initially available in shapefile format (EMBRAPA, 2022; Map Biomas, 2022a; Map Biomas, 2022b; Natural Earth, 2022, respectively) (Figure 1c), which were the basis for the construction of a raster file containing the Euclidean distance values in meters in the grids.

Data from the Map Biomas platform was used regarding the infrastructure factors potentially related to the geographical bias of the Brazilian cave distribution (2nd hypothesis). This data was also in 'shapefile' format, being: (v) metallic products mines (Iron, Copper, Aluminum, Gold, among others); (vi) energy products mines (Coal, Uranium, Natural Gas and Oil); (vii) mines of other products (Limestone, Phosphorus, Graphite, Silicon, among others); (viii) hydroelectric plants; (ix) small hydroelectric plants (SHPs); (x) transmission lines (Map Biomas, 2022c, Map Biomas, 2022d, Map Biomas, 2022e, Map Biomas, 2022f, Map Biomas, 2022g, Map Biomas, 2022h, respectively) (Figure 1c).

It is worth noting that the information available on MapBiomas represents a compilation of information from different organizations, such as IBGE, ANTT, EPE, ONS, MME, ANAC, interview data, bibliographic searches and reliable internet sources. In addition, the information has been updated from 1985 to August 2021. More details can be

ANTT, EPE, ONS, MME, ANAC, dados de entrevistas, buscas bibliográficas e fontes confiáveis da internet. Além disso, as informações foram atualizadas de 1985 até agosto de 2021. Mais detalhes podem ser obtidos no *Glossário das Camadas de Infraestrutura do MapBiomias* (disponível em: <<https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura>>).

Análise de Dados

Nós utilizamos a análise de estrutura bayesiana proposta por Zizka *et al.* (2020) que comparam a distribuição estatística de distância observada em um conjunto de dados (dados de ocorrência de cavernas) com uma distribuição esperada simulada por amostragens aleatórias (Zizka *et al.*, 2020) (Figura 1d). Primeiramente, avaliamos o peso posterior (a força do viés) gerado pela presença de cada fator selecionado dentro da nossa área de estudo (Figura 1e). Seguidamente, avaliamos a relação da taxa de amostragem (*n* de cavernas conhecidas por 'grid') em função da distância (km) para cada fator de viés dentro das áreas de ocorrência de cavernas, de acordo com o modelo bayesiano construído (Figura 1f). Além disso, realizamos projeções espaciais dos efeitos combinados entre os fatores de vieses (acessibilidade e infraestrutura) e as taxas de amostragem estimadas para os registros de ocorrência de cavernas (Figura 1g), medindo o efeito a partir do fator de maior viés, combinado em ordem decrescente com os demais (Figura S1).

Para construção dos modelos e mapas, utilizamos as áreas de ocorrência de caverna como limite de corte para todos os fatores, conforme descrito anteriormente, na resolução 'raster' de ~5 x 5 km (0.05°). Resoluções mais finas foram desconsideradas em função do tempo

found in the MapBiomias Infrastructure Layers Glossary (available at: <<https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura>>).

Data Analysis

*The Bayesian structure analysis proposed by Zizka et al. (2020) was used in this study. This analysis compares the statistical distribution of distance observed in a data set (cave occurrence data) with an expected distribution simulated by random sampling (Zizka et al., 2020) (Figure 1d). First, the posterior weight (the bias strength) generated by the presence of each selected factor within study area was evaluated (Figure 1e). Next, the relationship between the sampling rate (*n* of known caves per grid) as a function of distance (km) for each bias factor within the cave occurrence areas was evaluated, according to the Bayesian model constructed (Figure 1f). In addition, spatial projections of the combined effects between the bias factors (accessibility and infrastructure) and the estimated sampling rates for cave occurrence records were carried out (Figure 1g), measuring the effect from the factor with the greatest bias, combined in descending order with the others (Figure S1).*

The areas of cave occurrence were used as the cut-off point for all the factors, as described above, at a raster resolution of ~5 x 5 km (0.05°) to build the models and maps. Finer resolutions were disregarded due to the extremely high computing time and memory requirements (Zizka et al., 2020). The shapefiles and cave occurrence data were

de computação e os requisitos de memória serem extremamente elevados (Zizka *et al.*, 2020). Os 'shapefiles' e os dados de ocorrências de cavernas foram convertidos para o sistema de coordenadas geográficas com datum WGS84 antes das filtragens e análises. Todas as análises foram realizadas em ambiente R (R Development Core Team, 2022). Os modelos bayesianos de vieses de distribuição das cavernas foram construídos usando o pacote 'sambias' (Zizka *et al.*, 2020). Os mapas foram feitos através dos softwares QGIS 3.4 (Free, 2022) e Inkscape (Inkscape Team, 2022).

converted to the WGS84 geographic coordinate system before filtering and analysis. All analyses were carried out in the R environment (R Development Core Team, 2022). Bayesian models of cave distribution biases were built using the 'sambias' package (Zizka et al., 2020). The maps were made using QGIS 3.4 (Free, 2022) and Inkscape (Inkscape Team, 2022) software.

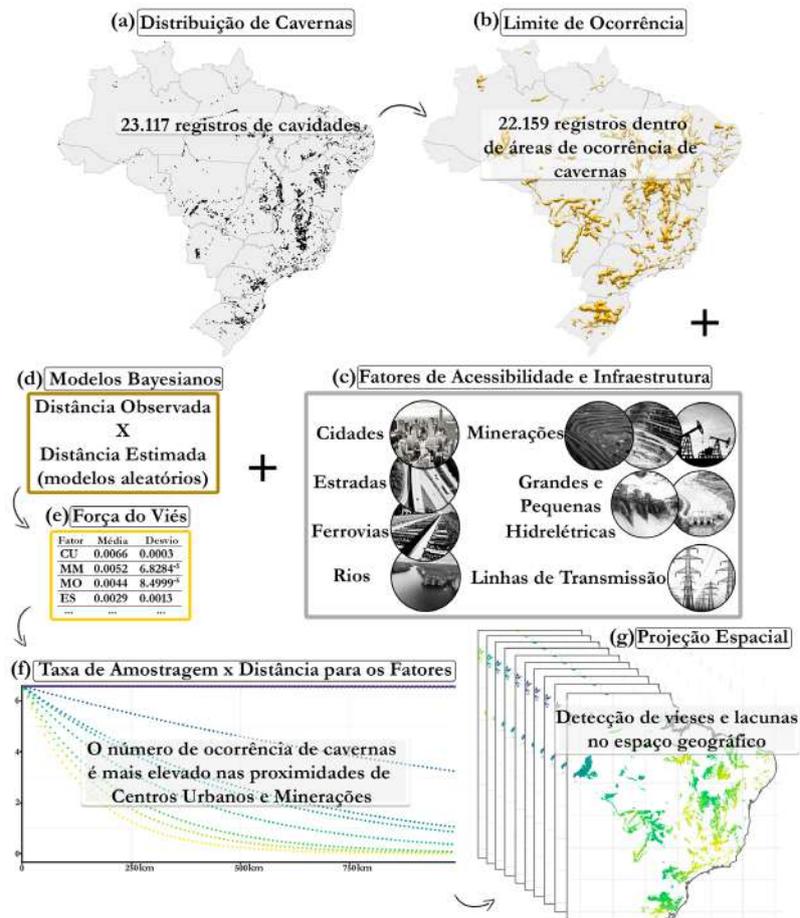


Figura 1 – Esboço resumido das etapas metodológicas e analíticas para testar a distribuição do conhecimento digital acessível de cavernas do Brasil em função de diferentes fatores de vieses de acessibilidade e infraestrutura. O primeiro passo consistiu em compilar os dados de registros de cavidades brasileiras presentes no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) (a). Em seguida, filtramos somente os registros presentes dentro das Áreas de Ocorrência de Cavernas (b). A terceira etapa consistiu em associar os locais com ocorrência de cavernas (b), aos fatores de infraestrutura e acessibilidade (c) para construção dos modelos bayesianos baseados em distância (d). Em seguida medimos a força do viés de cada fator analisado (e), a taxa de amostragem (nº de cavernas) em relação a distância (km) para os fatores (f), e projetamos o efeito dos vieses de ocorrência de cavernas combinados no espaço geográfico (g).

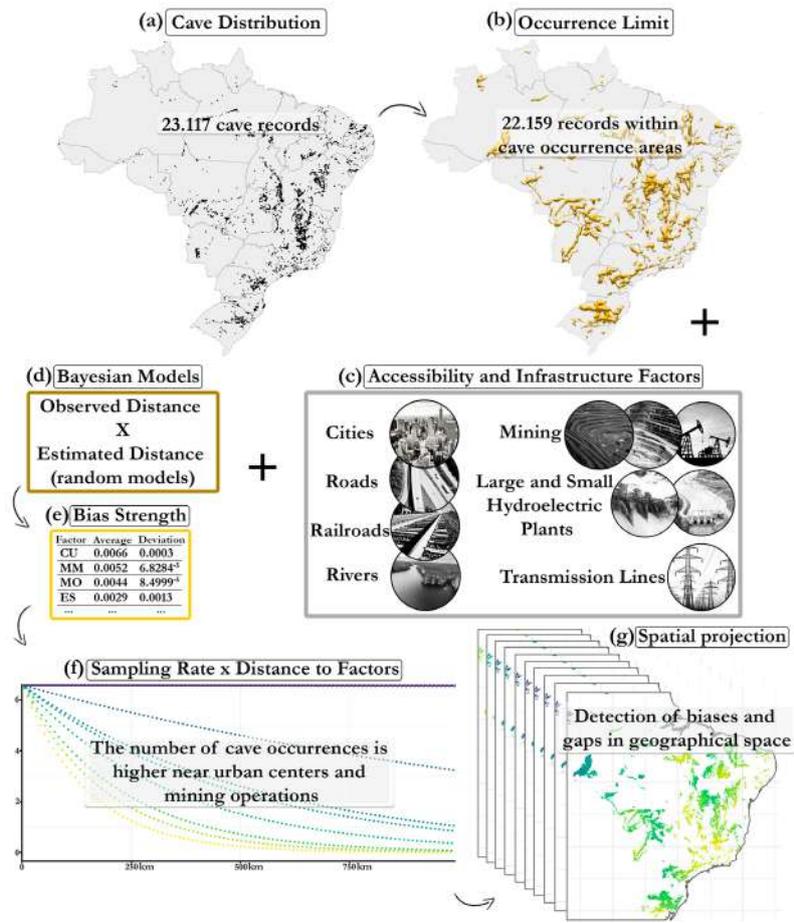


Figure 1 – Summary outline of the methodological and analytical steps to test the distribution of accessible digital knowledge of Brazilian caves as a function of different accessibility and infrastructure bias factors. The first step consisted of compiling the data on Brazilian cave records in the CANIE (a). Next, only the records present within the Cave Occurrence Areas were filtered (b). The third stage consisted of associating the cave occurrence sites (b) with the infrastructure and accessibility factors (c) in order to build Bayesian distance-based models (d). Then the bias strength of each factor analyzed was measured (e), the sampling rate (number of caves) in relation to distance (km) for the factors (f), and projected the effect of the combined cave occurrence biases in geographical space (g).

RESULTADOS

Nossos modelos mostraram um elevado peso posterior para o fator de acessibilidade representado pela distância de centros urbanos (CU) e para os fatores de infraestrutura da presença de minas de produtos metálicos (MM) e minas de outros produtos (MO), o que indica um forte efeito de viés dessas variáveis na distribuição das cavernas conhecidas no Brasil. Um peso posterior moderado foi observado para o fator de acessibilidade de distância de estradas (ES), indicando um viés moderado para a distribuição

RESULTS

Models showed a high posterior weight for the accessibility factor represented by distance from urban centers (UC) and for the infrastructure factors of the presence of metal product mines (MM) and other product mines (OM), indicating a strong bias effect of these variables on the distribution of known caves in Brazil. A moderate posterior weight was observed for the accessibility factor of distance from roads (RD), indicating a moderate bias for the distribution of caves. However, there were many outliers which reduced the strength of

de cavernas. Contudo, houve muitos valores 'outliers' que diminuíram a força de viés dessa variável (Figura 2a). Já os fatores de acessibilidade e infraestrutura presença de ferrovias (FE), linhas de transmissão (LT) e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) exibiram um peso posterior reduzido, ou seja, um efeito de viés fraco sobre a distribuição de cavernas. A presença de rios navegáveis (RN), usinas hidrelétricas (UH) e minas de produtos energéticos (ME) não foram variáveis relevantes sobre a distribuição conhecidas de cavernas brasileiras (Figura 2a).

A taxa de amostragem (nº ocorrência de cavernas por 'grid') se mostrou enviesada para locais próximos de centros urbanos (CU), de minas de produtos metálicos (MM) e de minas de outros produtos (MO) (Figura 2b). Um viés moderado foi evidente para proximidade de estradas (ES), ferrovias (FE) e linhas de transmissão (LT). Já a proximidade de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) exibiu um viés fraco. A proximidade de rios navegáveis (RN), usinas hidrelétricas (UH) e minas de produtos energéticos (ME) não apresentaram efeito relevante sob o número de ocorrência de cavidades (Figura 2b).

A análise da projeção espacial entre os três fatores de maior viés (centros urbanos + minas de produtos metálicos + minas de outros produtos) e o efeito sob o número de ocorrência de cavernas mostrou regiões super amostradas (enviesadas) e sub amostradas (lacunas Racovitzanas) para o Brasil (Figura 3). Existe um viés espacial acentuado de distribuição de cavernas principalmente para as regiões do Quadrilátero Ferrífero, Lagoa Santa, parte mais ao sul do grupo Bambuí, e também para formação Vazante, todas inseridas no estado do Minas Gerais (Figura 3). Algumas áreas menores e com

this variable's bias (Figure 2a). On the other hand, the accessibility and infrastructure factors like presence of railroads (RR), transmission lines (TL) and small hydroelectric plants (SHP) exhibited a reduced posterior weight, i.e. a weak bias effect on the distribution of caves. The presence of navigable rivers (NR), hydroelectric power plants (HPP) and energy product mines (EM) were not relevant variables on the known distribution of Brazilian caves (Figure 2a).

The sampling rate (nº of cave occurrences per grid) proved to be biased for sites close to urban centers (UC), metal product mines (MM) and other product mines (OM) (Figure 2b). A moderate bias was evident for proximity to roads (RD), railroads (RR) and transmission lines (TL). Proximity to small hydroelectric plants (SHP) exhibited a weak bias. The proximity of navigable rivers (NR), hydroelectric power plants (HPP) and energy product mines (EM) had no relevant effect on the number of caves (Figure 2b).

The analysis of the spatial projection between the three factors with the greatest bias (urban centers + metal product mines + other product mines) and the effect on the number of cave occurrences showed over-sampled (biased) and under-sampled (Racovitzan shortfalls) regions for Brazil (Figure 3). There is a marked spatial bias in the distribution of caves, mainly in the regions of the Iron Quadrangle, Lagoa Santa, the southernmost part of the Bambuí group, and also in the Vazante formation, all within the state of Minas Gerais (Figure 3). Some smaller areas with a large bias are also evident near the borders between Minas Gerais and the states of São Paulo and Rio de Janeiro. The states of São Paulo, Rio de Janeiro, Sergipe and the Federal District exhibited a moderate distribution bias in practically all of their cave occurrence areas. Finally, the

grande viés também são evidentes próximas às divisas entre Minas Gerais e os estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. Os estados de São Paulo, Distrito Federal, Rio de Janeiro e Sergipe exibiram um viés moderado de distribuição em praticamente todas as suas áreas de ocorrência de cavernas. Por fim, os estados do Rio Grande do Sul, Goiás, Pará, Bahia e Piauí exibiram algumas regiões com um acentuado viés, contudo também apresentam áreas subamostradas. Já os demais estados brasileiros apresentaram algumas poucas regiões com vieses variando de moderado a fraco. Dentre as regiões subamostradas (com lacunas de distribuição de cavernas) se destacaram: Amazonas, Roraima, parte norte e sul do Pará, e parte central de Tocantins (região Norte do Brasil); sudeste de Mato Grosso, parte norte do Mato Grosso do Sul, e leste de Goiás (região Centro-Oeste do Brasil); Maranhão, leste e norte do Piauí, e leste da Bahia (região Nordeste do Brasil).

states of Rio Grande do Sul, Goiás, Pará, Bahia and Piauí showed some regions with a pronounced bias, although they also have under-sampled areas. The other Brazilian states had a few regions with moderate to weak biases. Among the under-sampled regions (with shortfalls in cave distribution), the following stand out: Amazonas, Roraima, the northern and southern parts of Pará, and the central part of Tocantins (northern Brazil); the southeast of Mato Grosso, the northern part of Mato Grosso do Sul, and the east of Goiás (central-west Brazil); Maranhão, the east and north of Piauí, and the east of Bahia (northeast Brazil).

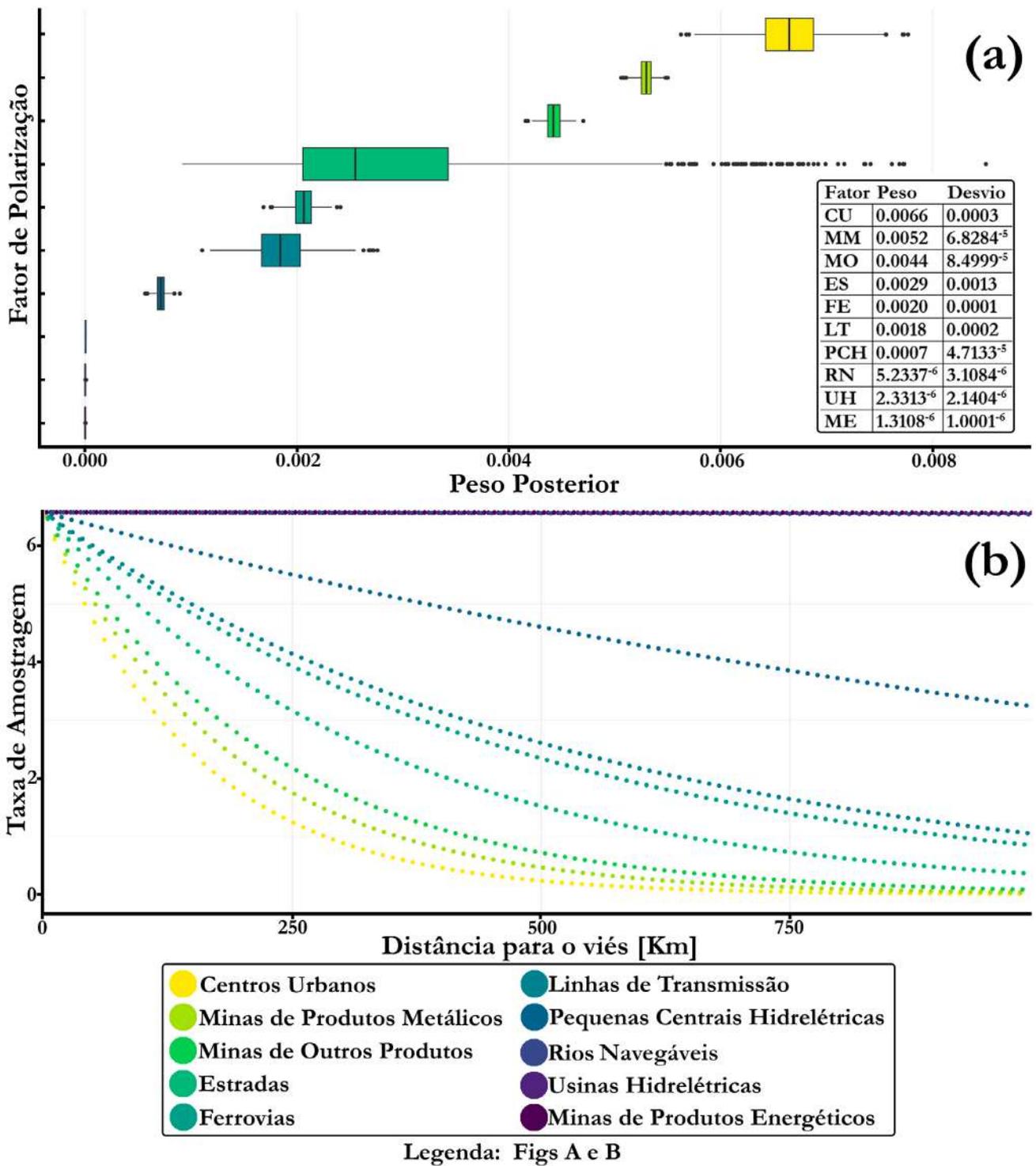


Figura 2 – Resultados dos modelos bayesianos de distância testando a força do viés de diferentes fatores de acessibilidade e infraestrutura sob a ocorrência de cavernas (a) e a relação da taxa de amostragem (nº de ocorrência de cavernas por *grid*) em função da distância para cada fator de viés testado no presente estudo (b). CU: centros urbanos; MM: minas de produtos metálicos; MO: minas de outros produtos; ES: estradas; FE: ferrovias; LT: linhas de transmissão; PCH: pequenas centrais hidrelétricas; RN: rios navegáveis; UH: usinas hidrelétricas; ME: minas de produtos energéticos.

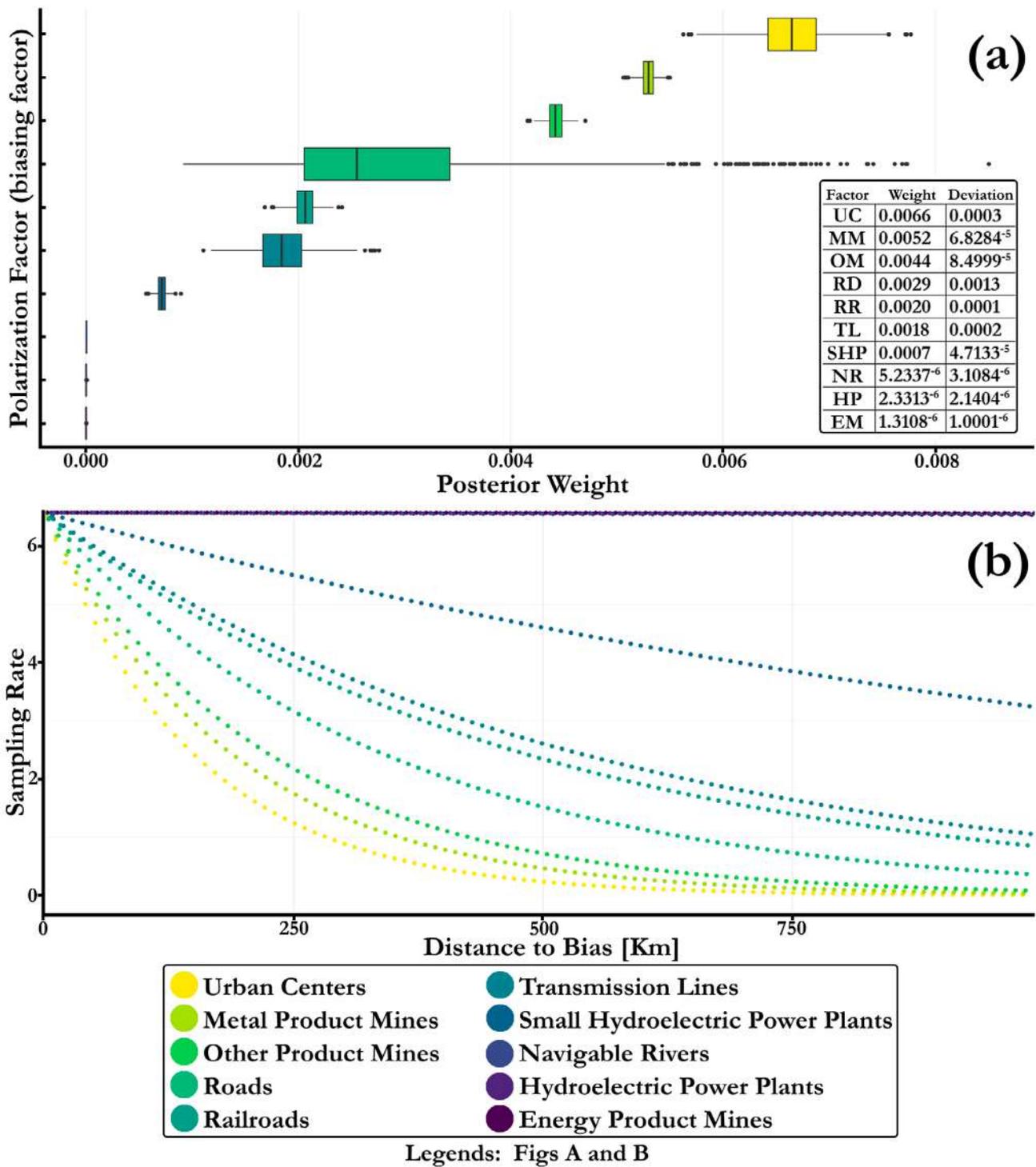


Figure 2 – Results of Bayesian distance models testing the bias strength of different accessibility and infrastructure factors on the cave occurrence (a) and the relationship of the sampling rate (number of caves per grid) as a function of distance for each bias factor tested in this study (b). UC: urban centers; MM: metal product mines; OM: other product mines; RD: roads; RR: railroads; TL: transmission lines; SHP: small hydroelectric plants; NR: navigable rivers; HP: hydroelectric plants; EM: energy product mines.

MAPA DE VIESES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAVERNAS DO BRASIL

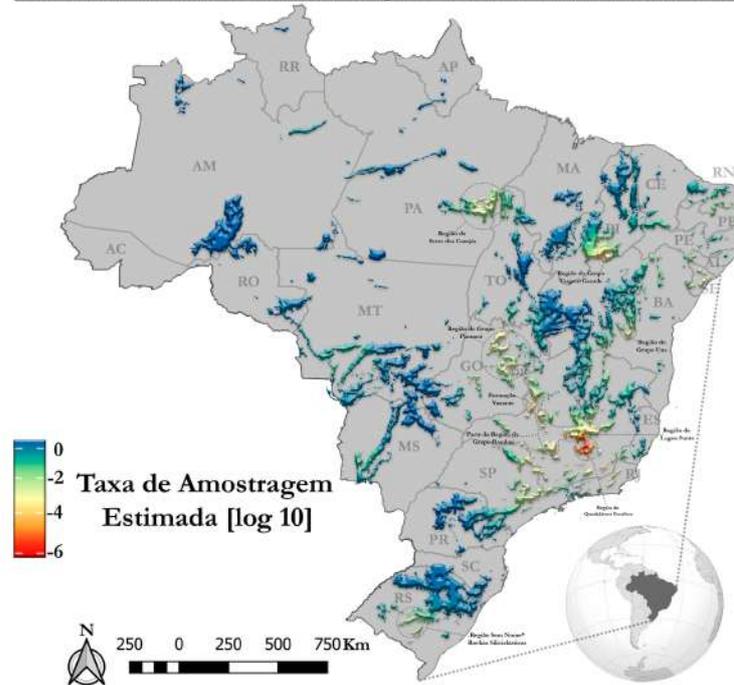


Figura 3 – Projeção espacial do viés de distribuição de cavernas do Brasil em função dos fatores de maior efeito (Centros Urbanos, Minas de Produtos Metálicos e Minas de Outros Produtos) dentro das Áreas de Ocorrência de Caverna. As cores mostram a projeção das taxas de amostragem transformadas em log10 conforme os modelos construídos. Regiões destacadas em vermelho indicam superamostragens (vieses) e as em azul, subamostragens (lacunas Racovitzanas).

BRAZIL'S CAVE BIAS DISTRIBUTION MAP

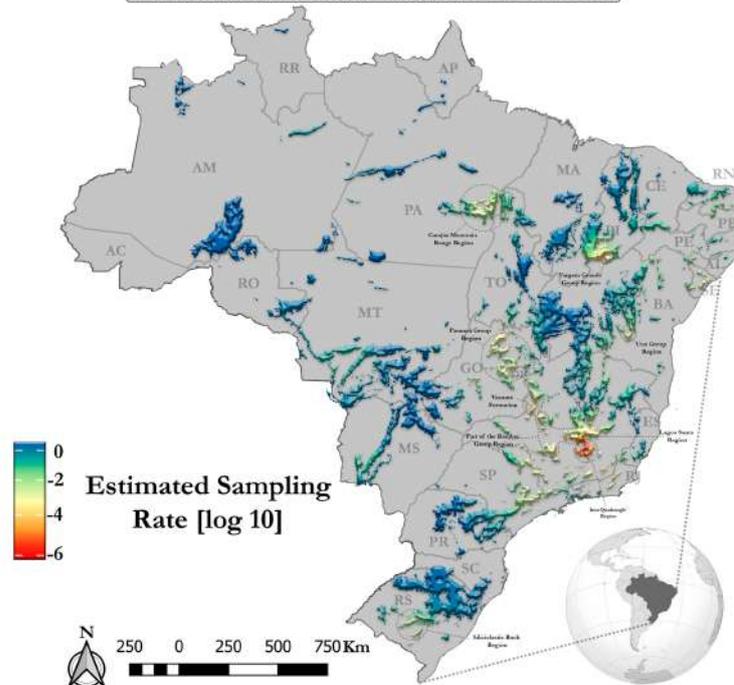


Figure 3 – Spatial projection of the Brazilian caves bias distribution as a function of the factors with the greatest effect (Urban Centers, Metal Product Mines and Other Product Mines) within the Cave Occurrence Areas. The colors show the sampling rates projection transformed into log10 according to the models constructed. Regions highlighted in red indicate oversampling (bias) and those in blue, undersampling (Racovitzan shortfalls).

DISCUSSÃO

Nossos modelos comprovaram nossas duas hipóteses de que fatores socioeconômicos e de acessibilidade são responsáveis por enviesar o conhecimento de distribuição geográfica de cavernas do Brasil. Este estudo é o primeiro a evidenciar que o conhecimento da distribuição geográfica de cavernas é enviesado para locais próximos a centros urbanos (fator de acessibilidade) e pela presença de mineração de produtos metálicos e mineração de outros produtos (fatores de infraestrutura). As regiões espacialmente mais enviesadas (super amostradas) se concentram principalmente dentro dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará e Piauí, enquanto alguns estados como Amazônia, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Maranhão ainda são extremamente sub explorados, ou seja, apresentam lacunas de amostragem de cavernas (lacunas Racovittzanas).

As Raízes dos Vieses de Distribuição Geográfica de Cavernas do Brasil

O forte viés para a super amostragem de cavernas, aqui representado pela distância de centros urbanos, pode ser explicado por questões logísticas, de expansão urbana e histórico de desenvolvimento dos empreendimentos. A proximidade de centros urbanos oferece uma logística mais fácil de exploração, como a presença de uma rede de estradas e vias de acesso que foi um fator moderado de viés. A expansão urbana atual deve estar em conformidade com o licenciamento ambiental brasileiro (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b), o que demanda o conhecimento e cadastramento das cavi-

DISCUSSION

The two hypotheses that socioeconomic and accessibility factors are responsible for biasing the knowledge of the geographical cave distribution in Brazil were proven by the models. This study is the first to show that knowledge of the geographical cave distribution is biased towards locations close to urban centers (accessibility factor) and by the presence of mining of metallic and other products (infrastructure factors). The most spatially biased regions (over-sampled) are concentrated mainly within the states of Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará and Piauí, while some states such as Amazônia, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná and Maranhão are still extremely under-explored. This means, they have cave sampling gaps (Racovittzan shortfalls).

The Roots of Brazilian Cave Geographical Distribution Biases

The strong bias towards caves oversampling is represented in this work by the distance from urban centers. It can be explained by logistical issues, urban sprawl and the enterprises development history. Proximity to urban centers offers easier exploration logistics, such as the presence of a network of roads and access routes, which was a moderate bias factor. Current urban expansion must comply with Brazilian environmental licensing (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b), which requires knowledge and registration of nearby underground caves. Historically, the main developments that have contributed over time to knowledge of the

dades subterrâneas nas proximidades. Historicamente, os principais empreendimentos que contribuíram ao longo do tempo para o conhecimento da distribuição de cavidades podem ter sido estabelecidos nas proximidades dos centros urbanos, uma relação que não foi explorada neste estudo.

Nesse sentido, locais não urbanizados podem representar áreas remotas e de difícil acesso, o que exigiria um maior tempo e gasto financeiro de exploração (Nelson *et al.*, 2019) para detecção de cavernas, e conseqüentemente um maior custo econômico e de esforço humano nas atividades de prospecção espeleológicas. Em especial, tal exploração é extremamente importante e tem sido realizada principalmente pelos grupos de espeleologia brasileiros, que em muitos casos podem não ter financiamento para esse tipo de estudo. No entanto, esse cenário tem se revertido lentamente ao longo dos últimos anos, com a abertura de editais visando apoio para prospecção espeleológica (ex., <https://www.cavernas.org.br/ampliando_rotas-edital_sbe_01_2023/>).

As minerações de produtos metálicos e mineração de outros produtos representam os fatores de infraestrutura que possivelmente estão mais ligados à descoberta de cavidades no Brasil, pois tais atividades dependem exclusivamente das principais paisagens onde os habitats cavernícolas estão inseridos (ex. rochas carbonáticas e ferríferas) (Jansen *et al.*, 2012). Isso explica nosso forte viés para esses fatores, e também prova que a descoberta de cavernas se dá principalmente em função de pressões econômicas que demandam licenciamento ambiental (Cruz & Piló, 2019), mas não em um investimento direto na espeleologia em todo território brasileiro (Escobar, 2021).

distribution of cavities may have been established near urban centers, a relationship that was not explored in this study.

*This way, non-urbanized sites can represent remote and difficult-to-access areas, which would require greater time and financial outlay for exploration (Nelson *et al.*, 2019) to detect caves, and consequently a greater economic cost and human effort in speleological prospecting activities. In particular, such exploration is extremely important and has been carried out mainly by Brazilian caving groups, which in many cases may not have funding for this type of study. However, this scenario has slowly been reversed over the last few years, with the opening of calls for proposals aimed at supporting speleological prospecting (e.g. <https://www.cavernas.org.br/ampliando_rotas-edital_sbe_01_2023/>).*

*The mining of metallic and other products represent the infrastructure factors that are possibly most linked to the discovery of caves in Brazil, as these activities depend exclusively on the main landscapes where cave habitats are located (e.g. carbonate and ferriferous rocks) (Jansen *et al.*, 2012). This explains the strong bias towards these factors, and proves that cave discovery is mainly due to economic pressures that require environmental licensing (Cruz & Piló, 2019), but not direct investment in speleology throughout Brazil (Escobar, 2021).*

The Racovitza shortfall (under-sampling) in distribution in Brazil's North and Midwest regions could easily be explained by the fact that these areas are remote, less urbanized and difficult to access (IBGE, 2022). However, it is possible that the registration of many caves was not carried out in the past, since speleological studies evolved mainly after Federal Decree No. 6640/2008 and Normative Instruction No. 2/2009/MMA, due to the greater obligation and scope of environmental

As lacunas Racovitzanas (sub amostragem) de distribuição nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, poderiam ser facilmente explicadas devido tais áreas serem remotas, menos urbanizadas e de difícil acesso (IBGE, 2022). No entanto, é possível que o cadastramento de muitas cavidades não tenha sido realizado no passado, uma vez que os estudos espeleológicos evoluíram principalmente após o Decreto Federal nº 6640/2008, juntamente com a Instrução Normativa nº 2/2009/MMA, devido à maior obrigatoriedade e abrangência do licenciamento ambiental em território brasileiro. Além disso, essas lacunas podem refletir áreas que tem tido um menor controle nos processos de licenciamento ambientais, baixa fiscalização, ou até mesmo a ausência da prática de licenciamentos espeleológicos em áreas com cavidades.

Como demonstrado aqui, a maioria das cavernas conhecidas no Brasil se encontram próximas aos centros urbanos e/ou atividades de mineração (exceto minerações ligadas à Carvão Mineral, Urânio, Gás natural e Petróleo) e, por isso, esses ambientes e ecossistemas estão expostos há uma série de impactos ambientais desafiadores, tais como: alteração e perda dos habitats de superfície (Trajano, 2000; Souza-Silva *et al.*, 2015; Mammola *et al.*, 2022), super exploração ou o despejo de reservatórios nos sistemas de água subterrânea das cavidades (Sanchez & Lobo, 2018), contaminação solo e/ou das águas subterrâneas por poluentes (Reboleira *et al.*, 2013; Souza-Silva *et al.*, 2015; Sugai *et al.* 2015; Sanchez & Lobo 2018), turismo (Moldovan *et al.*, 2013; Mammola *et al.*, 2022) e introdução de espécies não nativas e patógenos (Howarth *et al.*, 2007; Wynne *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2022). Além disso, à medida que as lavras de minerações ou centros

licensing in Brazilian territory. In addition, these gaps may reflect areas that have had less control in environmental licensing processes, low inspection, or even the absence of speleological licensing in areas with caves.

*As demonstrated here, the majority of known caves in Brazil are located close to urban centers and/or mining activities (except for mines related to coal, uranium, natural gas and oil). As a result, these environments and ecosystems are exposed to a series of challenging environmental impacts, such as: alteration and loss of surface habitats (Trajano, 2000; Souza-Silva *et al.*, 2015; Mammola *et al.*, 2022), overexploitation or the dumping of reservoirs into the caves' groundwater systems (Sanchez & Lobo, 2018), soil and/or groundwater contamination by pollutants (Reboleira *et al.*, 2013; Souza-Silva *et al.*, 2015; Sugai *et al.* 2015; Sanchez & Lobo 2018), tourism (Moldovan *et al.*, 2013; Mammola *et al.*, 2022) and the introduction of non-native species and pathogens (Howarth *et al.*, 2007; Wynne *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2022). In addition, as mining operations or urban centers expand, there is a risk of suppression of these low, medium and highly relevant caves. Therefore, discussing how the geographical bias of cave knowledge can be related to more effective conservation strategies and the mitigation of environmental impacts is extremely relevant for the maintenance of cave environments and their ecosystem services (water safety, for example) in Brazil.*

*With the available evidence, the presence of numerous regions that are extremely under-explored (gaps) or even neglected were highlighted, which represents the Racovitzan deficit (Ficetola *et al.*, 2019) within the space of cave occurrence areas in Brazilian territory. Such sites are possibly less studied and distant from stressors, such as the presence of urban centers and mining, or, on the*

urbanos venham a se expandir, há o risco de supressão dessas cavidades de categoria baixa, média e alta relevância. Logo, discutir como o viés geográfico do conhecimento de cavernas pode estar relacionado com estratégias de conservação mais efetivas, e mitigação de impactos ambientais, é extremamente relevante para a manutenção dos ambientes cavernícolas, e seus serviços ecossistêmicos (segurança hídrica, por exemplo) no Brasil.

Com as evidências disponíveis, nós destacamos a presença de inúmeras regiões extremamente sub exploradas (lacunas) ou até mesmo negligenciadas, o que representa o déficit Racovitzan (Ficetola *et al.*, 2019) dentro do espaço das áreas de ocorrência de cavernas em território brasileiro. Tais locais são possivelmente menos estudados e distantes de fatores estressores, como a presença de centros urbanos e minerações, ou, por outro lado, estão sendo extremamente negligenciados, o que abre espaço para iniciativas que visem subsidiar a proteção e fiscalização do patrimônio espeleológico nessas áreas. Desta forma, essas regiões são prioritárias para a conservação da biodiversidade, da geologia e dos serviços ecossistêmicos correlatos. Além disso, muitas destas áreas podem já estar ameaçadas pela expansão geográfica das atividades de mineração que vêm se expandindo para regiões de difícil acesso nos últimos anos (Ferreira *et al.*, 2014; Sugai *et al.*, 2015).

other hand, are being extremely neglected, which opens up space for initiatives aimed at subsidizing the protection and monitoring of speleological heritage in these areas. As such, these regions are a priority for the conservation of biodiversity, geology and related ecosystem services. In addition, many of these areas may already be threatened by the geographical expansion of mining activities, which have been expanding into difficult to access regions in recent years (Ferreira et al., 2014; Sugai et al., 2015).

Perspectivas Futuras

Destacamos que mapear e gerir os dados de distribuição de cavernas brasileiras pode representar um dos dados primários para sua conservação (Wynne *et al.*, 2021). Nesse sentido, a plataforma do CANIE é um ótimo exemplo prático de como o conhecimento sobre a distribuição geográfica de cavernas pode ser integrado e disponibilizado para a sociedade (CECAV 2022c). O CANIE tem contribuído principalmente com o acréscimo (descoberta) de cavidades ao longo dos anos, mas também contém informações extremamente relevantes sobre o número de cavernas que sofreram supressão total ou alteração parcial não mitigável (~400), o que também pode auxiliar na compreensão dos vieses e lacunas ao longo do tempo. No entanto, acreditamos que tal plataforma ainda carece de certas atualizações e da total incorporação desse tipo de dado (destruição de cavidades) de maneira mais abrangente pelos órgãos ambientais, tendo em vista que as cavernas são um bem da União, como previsto pelo Art. 20 da Constituição de 1988.

Embora não tenhamos considerado as informações sobre a potencialidade de ocorrência de cavernas em diferentes litologias para a construção dos nossos modelos (CECAV, 2022a), mas sim como limite. Acreditamos fortemente que uma das soluções para mitigar os vieses de conhecimento discutidos aqui pode estar na tentativa de estabelecer uma nova predição robusta da possível quantidade de cavernas que podem ser encontradas em diferentes litologias em uma escala de estudo refinada (ex., grids de 0.5km x 0.5km ou menor). Se existem áreas com litologias que já foram bem prospectadas (ex.,

Future perspectives

It should be noted that mapping and managing the distribution data of Brazilian caves can represent one of the primary data points for their conservation (Wynne et al., 2021). In this regard, the CANIE platform is a great practical example of how knowledge about the geographical cave distribution can be integrated and made available to society (CECAV 2022c). CANIE has mainly contributed to the addition (discovery) of caves over the years, but it also contains extremely relevant information on the number of caves that have suffered total suppression or unmitigated partial alteration (~400), which can also help to understand biases and gaps over time. However, we believe that this platform still needs certain updates and the full incorporation of this type of data (destruction of caves) in a more comprehensive manner by environmental agencies, given that caves are a federal asset, as provided for in Article 20 of the 1988 Constitution.

Although the information on the potential cave occurrence in different lithologies was not considered for the construction of the models presented here (CECAV, 2022a), it was considered as a limit. We strongly believe that one of the solutions to mitigate the knowledge biases discussed here may lie in trying to establish a new robust prediction of the possible amount of caves that can be found in different lithologies at a refined study scale (e.g. grids of 0.5km x 0.5km or smaller). If there are areas with lithologies that have already been well prospected (e.g. limestone or canga outcrops), we could calibrate predictive mathematical models using these reference areas and apply them in the future to similar areas that have not been explored.

afloramentos de calcário ou de canga), poderíamos calibrar modelos matemáticos preditivos usando essas áreas de referência e aplicá-los em áreas similares que não foram exploradas no futuro.

Aqui, concluímos que a exploração econômica tem gerado um conhecimento enviesado acerca da distribuição de cavernas, o que pode estar ligado aos embates históricos entre nossa legislação de exploração vs. conservação (Sion, 2022). E tendo em vista a ausência de políticas conservacionistas para a proteção desses ambientes em larga escala (Mammola *et al.*, 2020), atualmente torna-se imprescindível que novas políticas sobre a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro considerem toda a paisagem espeleológica, seus vieses (locais mais bem estudados), lacunas Racovitzanas (locais menos estudados ou possivelmente negligenciados), e os processos socioeconômicos que implicam nestes, conforme aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos à equipe do Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade (MacrEco) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelas valiosas discussões. RACS e NB agradecem principalmente a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de doutorado concedidas. TSS agradece a FAPEMAT (projeto FAPEMAT-PRO.000274/2023). Agradecemos à IABS/CECAV (edital 01/2023 - TCCE Vale 01/2022) pelo financiamento concedido e às plataformas que disponibilizaram os dados digitalmente acessíveis que permitiram a realização deste estudo: ICMBio/Cecav, MapBiomas, EMBRAPA e Natural Earth. RACS agradece, em particular, a Alex-

*Therefore, it is concluded that economic exploitation has generated biased knowledge about the cave distribution, which may be linked to the historical clashes between exploitation and conservation legislation (Sion, 2022). Furthermore, given the lack of conservation policies for the protection of these environments on a large scale (Mammola *et al.*, 2020), it is currently essential that new policies on the conservation of Brazil's speleological heritage consider the entire speleological landscape, its biases (better studied sites), Racovitzan shortfalls (less studied or possibly neglected sites), and the socio-economic processes that imply these.*

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the Laboratory of Macroecology and Biodiversity Conservation's team (Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade MacrEco) at the Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal de Mato Grosso UFMT) for their valuable discussions. RACS and NB would especially like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES) for the doctoral scholarships granted. TSS thanks FAPEMAT (FAPEMAT-PRO.000274/2023 project). We would like to thank the IABS/CECAV (edital 01/2023 - TCCE Vale 01/2022) for the granted funding and the platforms that provided the digitally accessible data that

sandro Pereira, Denizar Alvarenga, Edvard Magalhães, Lucas Rabelo, Marcos Paulo, Marconi Souza-Silva, Marden Linares, Rodrigo Ferreira, Tiago Vilaça, Vanessa Martins, pelas discussões filosóficas acerca do mundo das cavernas. Em particular, a Maria Peñaflor por todo incentivo, bem como pelas valiosas sugestões e debates desde as primeiras versões deste estudo. Agradecemos profundamente aos quatro revisores que fizeram sugestões na primeira versão deste estudo, assim como a todas as pessoas que participaram das discussões sobre a conservação do patrimônio espeleológico no 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia, possibilitando uma melhoria substancial em nossa discussão. Por fim, agradecemos as preciosas discussões do grupo de trabalho sobre “Lacunas de Biodiversidade”, patrocinado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ecologia, Evolução e Conservação da Biodiversidade (CNPq proc. 465610/2014-5 e FAPEG proc. 201810267000023).

enabled this study to be carried out: ICMBio/Cecav, MapBiomas, EMBRAPA and Natural Earth. RACS would particularly like to thank Alexandro Pereira, Denizar Alvarenga, Edvard Magalhães, Lucas Rabelo, Marcos Paulo, Marconi Souza-Silva, Marden Linares, Rodrigo Ferreira, Tiago Vilaça and Vanessa Martins for their philosophical discussions about the cave world. In particular, Maria Peñaflor for all her encouragement, as well as her valuable suggestions and discussions from the very first versions of this study. We are deeply grateful to the four reviewers who made suggestions on the first version of this study, as well as to all the people who took part in the discussions on the conservation of speleological heritage at the 37th Brazilian Speleology Congress, making it possible to substantially improve our discussion. Finally, we express our gratitude for the valuable discussions of the working group on “Biodiversity Shortfalls” sponsored by the National Institutes for Science and Technology (INCT) in Ecology, Evolution, and Biodiversity Conservation (CNPq proc. 465610/2014-5 and FAPEG proc. 201810267000023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; KAKOOEI, M.; MOGHIMI, A.; MIRMAZLOUMI, S. M.; *et al.* Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 5326-5350, 2020.

BARRA, C. Controversial cave discoveries suggest humans reached Americas much earlier than thought. *Nature*, v. 583, n. 7818, p. 670-671, 2020.

BOTTS, E. A.; ERASMUS, B. F.; ALEXANDER, G. J. Geographic sampling bias in the South African Frog Atlas Project: implications for conservation planning. *Biodiversity and Conservation*, v. 20, n.1, p. 119-139, 2011.

BRASIL. *Lei nº 6938 de 1981*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%206.938%2C%20DE%2031%20DE%20AGOSTO%20DE%201981&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,aplica%C3%A7%C3%A3o%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs>. Acessado em: 11 nov. 2022a.

BRASIL. *Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986*. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acessado em: 11 nov. 2022b.

BRASIL. *Resolução CONAMA Nº 347/2004, de 10 de setembro de 2004*. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_347_2004.pdf>. Acessado em: 11 nov. 2022c.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acessado em: 11 ago. 2023d.

BRASIL. *Decreto nº 6.640, de 07 de novembro de 2008*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6640.htm> Acessado em: 11 ago. 2023e.

BRASIL. *Instrução Normativa nº 2, de 20 de agosto de 2009*. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0002-200809.PDF>>. Acessado em: 11 de ago. 2023f.

BURNEY, D. A.; HUME, J. P.; RANDALANA, R.; ANDRIANAIVOARIVELO, R. A.; GRIFFITHS, O.; MIDDLETON, G. J.; *et al.* Rock art from andriamamelô cave in the beanka protected area of western Madagascar. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, v. 17, n. 2, p. 171-194, 2022.

CECAV. *Potencialidade de Ocorrência de Cavernas*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/potencialidade-de-ocorrencia-de-cavernas.html>>. Acessado em: 24 nov. 2022a.

CECAV. *Orientações Básicas a Realização de Estudos Espeleológicos*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/orientacoes-e-procedimentos/termo-de-referencia.html>>. Acessado em: 26 nov. 2022b.

CECAV. *Cadastro Nacional De Informações Espeleológicas – CANIE*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acessado em: 10 nov. 2022c.

CECAV. *Áreas de Ocorrência de Cavernas do Brasil*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html#:~:text=%C3%81reas%20de%20Ocorr%C3%Ancia%20de%20Cavernas%20do%20Brasil&text=Em%201986%2C%20as%20prov%C3%ADncias%20Rio,KARMANN%20e%20S%C3%81NCHES%2C%201986>>. Acessado em: 10 nov. 2022d.

CRUZ, J.; PILÓ, L. *Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. Brasília: Editora IABS, 2019. 262p.

DAMM, S.; YOUNG, A. Caving In: An Archaeology of Historical Cave Exploration and Exploitation. *Nebraska Anthropologist*, v. 185, p. 74-183, 2013.

DARU, B. H.; PARK, D. S.; PRIMACK, R. B.; WILLIS, C. G.; BARRINGTON, D. S.; WHITFELD, T. J.; Whitfeld, T. J. S.; *et al.* Widespread sampling biases in herbaria revealed from largescale digitization, *New Phytologist*, v. 217, n. 2, p. 939-955, 2018.

DÉTROIT, F.; MIJARES, A. S.; CORNY, J.; DAVER, G.; ZANOLLI, C.; DIZON, E.; *et al.* A new species of Homo from the Late Pleistocene of the Philippines, *Nature*, v. 568, n. 7751, p. 181-186, 2019.

EMBRAPA. *Áreas Urbanas no Brasil em 2015*. Disponível em: <http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15>. Acessado em: 21 nov. 2022.

ESCOBAR, H. *Cavernas do Brasil: um tesouro subterrâneo a ser descoberto, mas já ameaçado*. *Jornal da USP*. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/cavernas-do-brasil-um-tesouro-subterraneo-a-ser-descoberto-mas-ja-ameacado/>>. Acessado em: 01 dez. 2021.

FERREIRA, R. L.; BERNARD, E.; DA CRUZ JÚNIOR, F. W.; PILÓ, L. B.; CALUX, A.; SOUZA-SILVA, M.; *et al.* Brazilian cave heritage under siege. *Science*, v. 375 n. 6586, p. 1238-1239, 2022.

FERREIRA, J.; ARAGÃO, L.E.O.C.; BARLOW, J.; BARRETO, P.; BERENQUER, E.; BUSTAMANTE, M.; *et al.* 2014. Brazil's environmental leadership at risk. *Science*, v. 346, p. 706-707, 2014.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; & SOUZA-SILVA, M. Subterranean Biodiversity in Ferruginous Landscapes. In: MOLDOVAN, O. T.; KOVÁČ, L.; HALSE, S. *Cave Ecology*. Springer, Cham, 2018. cap. 21, p. 435-447.

FICETOLA, G. F.; CANEDOLI, C.; STOCH, F. The Racovitza impediment and the hidden biodiversity of unexplored environments. *Conservation Biology*, v. 33, n. 1, p. 214-216, 2019.

FREE QA (2022) *Open Source Geographic Information System*. Disponível em: <<https://www.qgis.org/en/site/>>. Acessado em: 01 jul. 2022.

HOWARTH, F. G.; JAMES, S. A.; MCDOWELL, W.; PRESTON, D. J.; IMADA, C. T. Identification of roots in lava tube caves using molecular techniques: implications for conservation of cave arthropod faunas. *Journal of Insect Conservation*, v. 11, n. 3, p. 251-261, 2007.

IBGE. *Áreas Urbanizadas do Brasil 2019*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/areas_urbanizadas/#/home>. Acessado em 02 dez. 2022.

INKSCAPE TEAM. *Inkscape: A vector drawing tool*. Disponível em: <<https://www.inkscape.org>>. Acessado em: 12 fev. 2022.

JANSEN, D.C.; CAVALCANTI, L. F.; LAMBLÉM, H. S. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala 1: 2.500. 000. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, n. 1, p. 42-57, 2012

MAMMOLA, S. Finding answers in the dark: caves as models in ecology fifty years after Poulson and White. *Ecography*, v. 42, n. 7, p. 1331-1351, 2019.

MAMMOLA, S.; CARDOSO, P.; CULVER, D. C.; DEHARVENG, L.; FERREIRA, R. L.; FIŠER, C. *et al.* Scientists' warning on the conservation of subterranean ecosystems. *BioScience*, v. 69, n. 8, p. 641-650, 2019a.

MAMMOLA, S.; AMORIM, I. R.; BICHUETTE, M. E.; BORGES, P. A.; CHEEPHAM, N.; COOPER, S. J.; *et al.* Fundamental research questions in subterranean biology. *Biological Reviews*, v. 95, n. 6, p. 1855-1872, 2020.

MAMMOLA, S.; MEIERHOFER, M. B.; BORGES, P. A.; COLADO, R.; CULVER, D. C.; DEHARVENG, L.; *et al.* Towards evidence based conservation of subterranean ecosystems. *Biological Reviews*, v. 97, n. 4, p. 1476-1510, 2022.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Trechos Rodoviários Gerais*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022a.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Ferrovário*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022b.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Produto Metálico*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022c.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Produto Energético*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022d.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Outros Produtos*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022e.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Usina Hidrelétrica*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022f.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Pequena Central Hidrelétrica*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022g.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Linha de Transmissão*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022h.

MEYER, C.; KREFT, H.; GURALNICK, R.; JETZ, W. Global priorities for an effective information basis of biodiversity distributions. *Nature communications*, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2015.

MOLDOVAN, O. T.; RACOVITZA, G.; RAJKA, G. The impact of tourism in Romanian show caves: the example of the beetle populations in the Ursilor Cave of Chiscau (Transylvania, Romania). *Subterranean biology*, v. 1, p. 73-78, 2003.

NATURAL EARTH. *Rivers + lake centerlines*. Disponível em: <<https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/10m-rivers-lake-centerlines/>>. Acessado em: 07 nov. 2022.

NELSON, A.; WEISS, D. J.; VAN ETTEN, J.; CATTANEO, A.; MCMENOMY, T. S.; KOO, J. A suite of global accessibility indicators. *Scientific data*, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2019.

NOVELLO, V. F.; CRUZ, F. W.; VUILLE, M.; STRÍKIS, N. M.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H.; *et al.* A high-resolution history of the South American Monsoon from Last Glacial Maximum to the Holocene. *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2017.

OLIVEIRA, U.; PAGLIA, A. P.; BRESOVIT, A. D.; DE CARVALHO, C. J.; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; *et al.* The strong influence of collection bias on biodiversity knowledge shortfalls of Brazilian terrestrial biodiversity. *Diversity and Distributions*, v. 22, n. 12, p. 1232-1244, 2016.

PARKER, C. W.; SENKO, J. M.; AULER, A. S.; SASOWSKY, I. D.; SCHULZ, F.; WOYKE, T.; BARTON, H. A. Enhanced terrestrial Fe (II) mobilization identified through a novel mechanism of microbially driven cave formation in Fe (III)-rich rocks. *Scientific reports*, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2022.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011. Cap. 1, p. 7-23.

PRICE, L.; TRAVASSOS, L. E. P. Uso religioso de cavernas no Sudeste Asiático e China: a paisagem cárstica sob outra perspectiva. *Ateliê Geográfico*, v. 10, n. 3, p. 129-154, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2022) R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for statistical computing. Disponível em: <<https://www.Rproject.org/>>. Acessado em 2 nov. 2022.

REBOLEIRA, A. S. P.; ABRANTES, N.; OROMÍ, P.; GONÇALVES, F. Acute toxicity of copper sulfate and potassium dichromate on stygobiont *Proasellus*: general aspects of groundwater ecotoxicology and future perspectives. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 224, n. 5, p. 1-9, 2013.

RIDDLE, M. R.; ASPIRAS, A. C.; GAUDENZ, K.; PEUß, R.; SUNG, J. Y.; MARTINEAU, B.; et.al. Insulin resistance in cavefish as an adaptation to a nutrient-limited environment. *Nature*, v. 555, n. 7698, 647-651.

SANCHEZ, L.; LOBO, H. *Guidebook of good environmental practices for the quarrying of limestone in Karst Areas*. Campinas: Brazilian Speleological Society. 2018. 263p.

SION, A. O. A Proteção Espeleológica no Brasil e a Nova Regulamentação da Exploração de Cavernas. In: Sánchez-Bravo, Á. *Semper sapiens: libro homenaje al profesor Dr. Felipe Rotondo Tornarúa*. Editorial Alma Mater: España, 2022. cap. 2, p. 39-57.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R.L. Cave conservation priority index to adopt a rapid protection strategy: a case study in Brazilian Atlantic rain forest. *Environmental management*, v. 55, n. 2, p. 279-295, 2015.

SUGAI, L. S. M.; OCHOA-QUINTERO, J. M.; COSTA-PEREIRA, R.; ROQUE, F. O. Beyond aboveground. *Biodiversity and Conservation*, v. 24, n. 8, p. 2109-2112, 2015.

POULSON, T. L.; WHITE, W. B. The Cave Environment: Limestone caves provide unique natural laboratories for studying biological and geological processes. *Science*, v. 165, n. 3897, p. 971-981, 1969.

TRAJANO, E. Cave Faunas in the Atlantic Tropical Rain Forest: Composition, Ecology, and Conservation. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 882-893, 2000.

TRAVASSOS, L. E. P. Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Editora IABS: Brasília, 2019. 246p.

WYNNE, J.J.; HOWARTH, F.G.; MAMMOLA, S.; FERREIRA, R.L.; CARDOSO, P.; LORENZO, T.D.; et al. A conservation roadmap for the subterranean biome. *Conservation Letters*, v. 14, n. 5, p. 1-6, 2021.

WYNNE, J. J.; BERNARD, E. C.; HOWARTH, F. G.; SOMMER, S.; SOTO-ADAMES, F. N.; TAITI, S.; *et al.* Disturbance relicts in a rapidly changing world: the Rapa Nui (Easter Island) factor. *BioScience*, v. 64, n. 8, p. 711-718, 2014.

YANG, W.; MA, K.; KREFT, H. Environmental and socio economic factors shaping the geography of floristic collections in China. *Global Ecology and Biogeography*, v. 23, n. 11, p. 1284-1292, 2014.

YOSHIZAWA, M.; SETTLE, A.; HERMOSURA, M. C.; TUTTLE, L. J.; CETRARO, N.; PASSOW, C. N.; MCGAUGH, S. E. The evolution of a series of behavioral traits is associated with autism-risk genes in cavefish. *BMC evolutionary biology*, v. 18, n. 1, p. 1-16., 2018.

ZIZKA, A.; RYDÉN, O.; EDLER, D.; KLEIN, J.; ARONSSON, H.; PERRIGO, A.; *et al.* Exploring the impact of political regimes on biodiversity. *V-Dem Working Papers*, v. 98, p. 1-13, 2020.

ZIZKA, A.; ANTONELLI, A.; SILVESTRO, D. *Sampbias*, a method for quantifying geographic sampling biases in species distribution data. *Ecography*, v. 44, n. 1, p. 25-32, 2021.

MATERIAL SUPLEMENTAR – PROJEÇÃO ESPACIAL DOS FATORES COMBINADOS

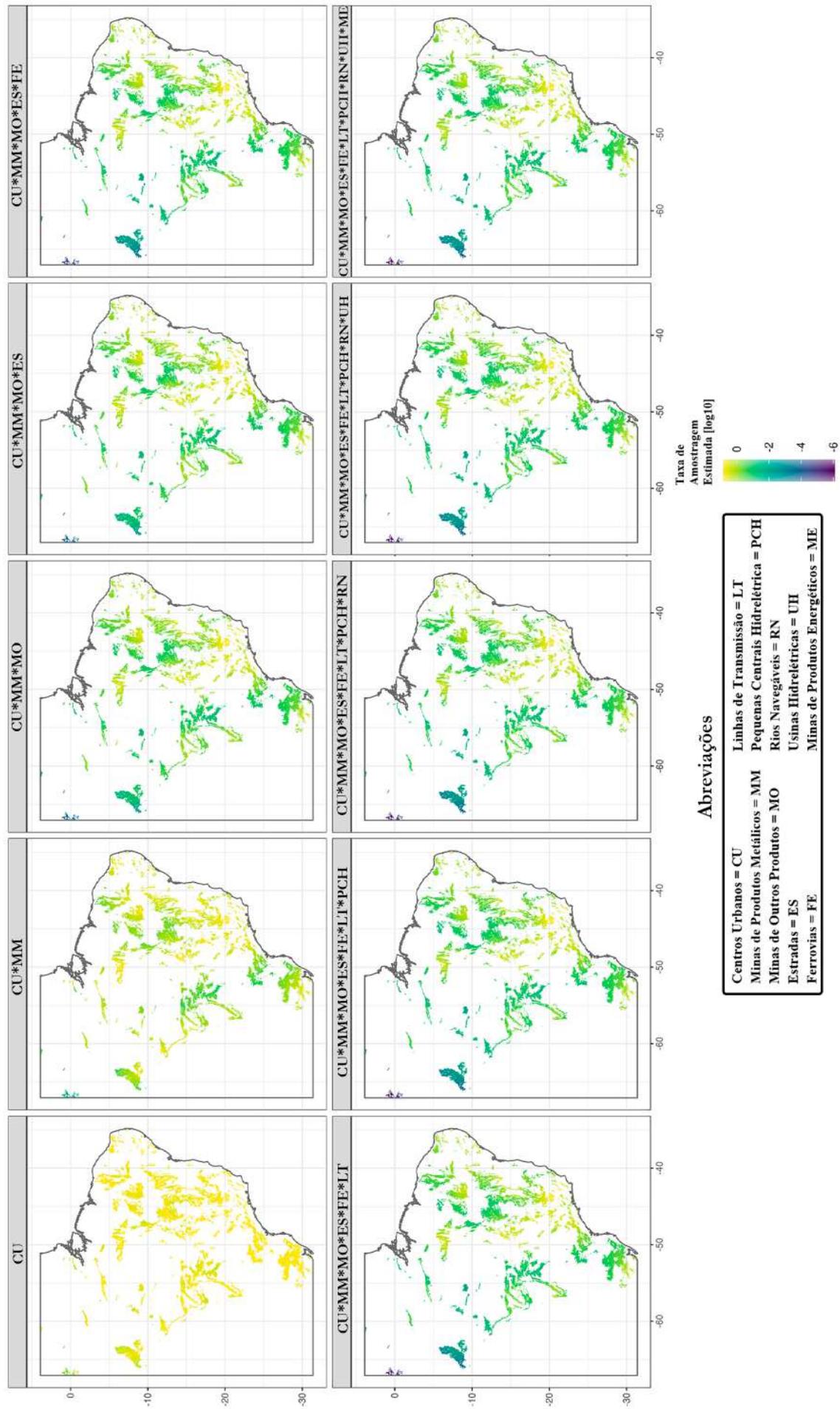


Figura S1 – Projeção espacial das diferentes combinações de fatores de acessibilidade e infraestrutura sob a taxa de amostragem de cavernas (nº de ocorrência de cavernas por 'grid') dentro das áreas de ocorrência de cavernas do Brasil. As combinações entre os fatores com maior efeito de viés estão alinhadas em ordem decrescente da esquerda para direita.

SUPPLEMENTARY MATERIAL - SPATIAL PROJECTION OF COMBINED FACTORS

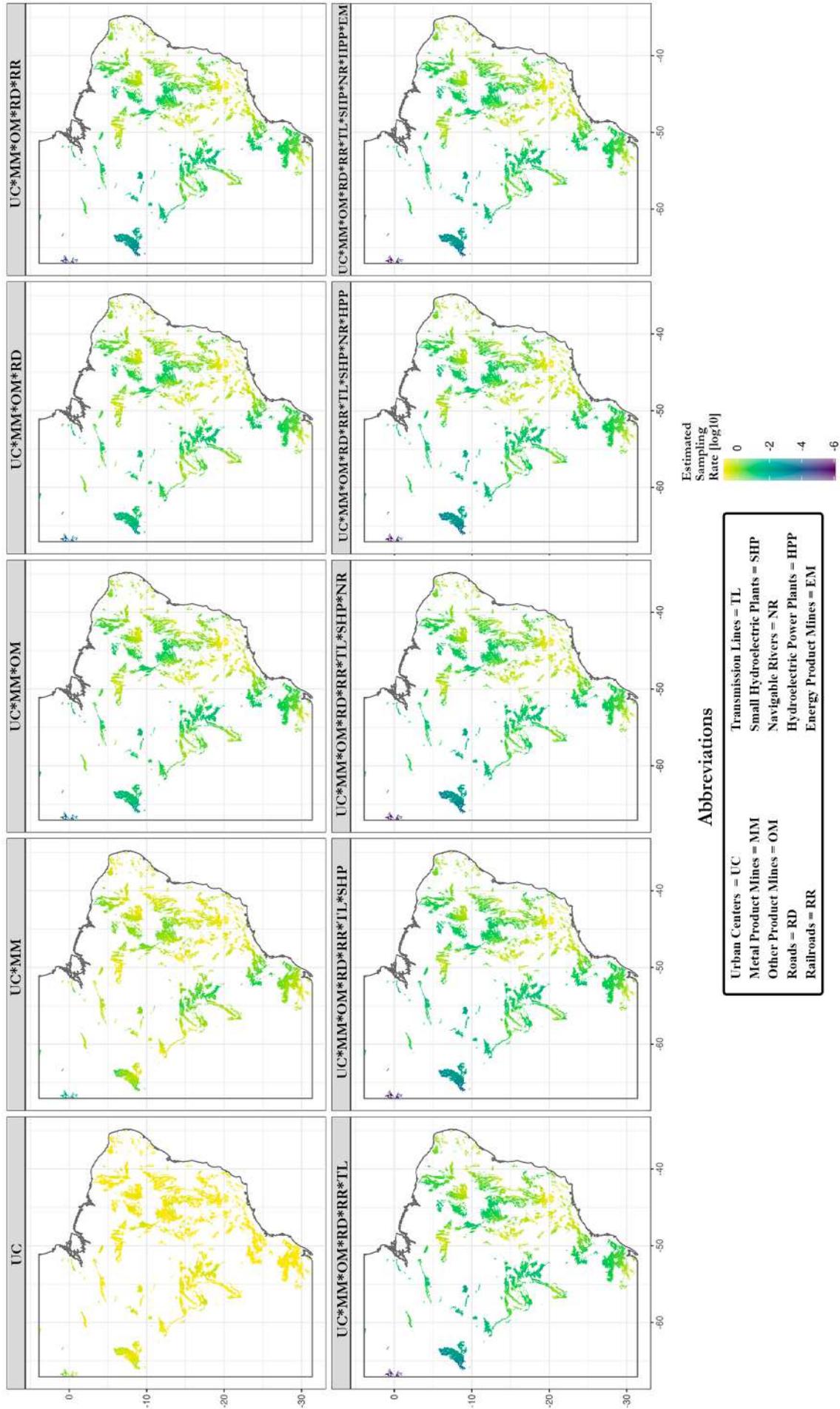


Figure S1 – Spatial projection of different combinations of accessibility and infrastructure factors on the sampling rate of caves (number of caves per grid) within Brazil's cave occurrence areas. The combinations of factors with the greatest bias effect are aligned in descending order from left to right.

MATERIAL SUPLEMENTAR/SUPPLEMENTARY MATERIAL - R CÓDIGO/CODE

```
#-----#
#####VIESES NO CONHECIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE CAVERNA DO BRASIL#####
#####BIASES IN THE KNOWLEDGE OF THE GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL#####
#-----carregando pacotes/loading packages-----#
require(devtools)
install_github(repo = "azizka/sampbias", force = TRUE)
library(sampbias)
library(maptools)
library(rgdal)
library(raster)
library(tidyverse)
library(readxl)
library(xlsx)
library(openxlsx)
library(data.table)
setwd(choose.dir())
#Nota: os mapas do CANIE e de Área de Ocorrência de Cavernas do Brasil precisam ser convertidos para
a projeção WGS 84 #antes do início das análises, tais conversões podem ser realizadas em ambiente SIG
(ex., ArcGis ou QGIS) ou até mesmo em #ambiente R ou Python. Aqui, fornecemos um breve exemplo desta
conversão em R/Note: The CANIE and Cave Occurrence #Area maps of Brazil need to be converted to the WGS
84 projection before the start of the analyses. Such conversions can be #performed in a GIS environment (e.g.,
ArcGIS or QGIS) or even in R or Python. Here, we provide a brief example of this #conversion in R:
sirgas_01 <- readOGR("registros_cavernas_sg.shp")
sirgas_02 <- readOGR("areas_cavernas_sg.shp")
wgs84_01 <- spTransform(sirgas_01, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
wgs84_02 <- spTransform(sirgas_02, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
writeOGR(wgs84_01, layer = "registros_cavernas_wgs.shp", driver = "ESRI Shapefile")
writeOGR(wgs84_02, layer = "areas_cavernas_wgs.shp", driver = "ESRI Shapefile")
#-----abrindo dados do CANIE/open CANIE data-----#
occ <- read_excel("registros_cavernas.xlsx", sheet = 1) %>% dplyr::select(species = Caverna, decimalLongitude =
Longitude, decimalLatitude = Latitude)
glimpse(occ)
test.points <- occ %>% dplyr::select(decimalLongitude, decimalLatitude, species) %>% as.data.frame()
coordinates(test.points) <- ~decimalLongitude+decimalLatitude
#-----abrindo as áreas de ocorrência de cavernas (nosso limite)/opening the cave occurrence areas (our limit)----#
land <- readOGR("areas_cavernas_wgs.shp")
plot(land)
```

```

#--filtrando registros de ocorrência de cavernas dentro do limite/ filtering cave occurrence records within the
boundary--#
sp <- SpatialPoints(test.points, proj4string=CRS(proj4string(land)))
spsel <- sp[land]
over(sp, land)
occ_land <- occ %>% dplyr::select(decimalLongitude,decimalLatitude,species) %>%
cbind(over(sp, land))
glimpse(occ_land)
occ_in_land <- occ_land %>% filter(!is.na(OBJECTID))
occ_ocean <- occ_land %>% filter(OBJECTID %in% NA) %>% as_tibble()
occ_cave_clean <-dplyr::select(occ_in_land, -(OBJECTID,Rocha_Pred,Shape_Leng,Shape_Area))
#-----salvando ocorrências filtradas/saving filtered occurrences-----#
occ_cave_clean %>% write.table("occ_cave_clean.txt",
                             append = FALSE, sep = "\t", dec = ".",
                             row.names = FALSE, col.names = TRUE, quote = FALSE, fileEncoding = "UTF-8")
#-----abrindo as ocorrências filtradas-----#
occ <- fread(file = "occ_cave_clean.txt", h = T, encoding = 'UTF-8', quote = "'") %>% dplyr::select(species,
decimalLongitude,decimalLatitude)
#---abrindo a área onde os modelos serão construídos/ opening the background area where the models will
be constructed---#
areas_cavernas <- readOGR("areas_cavernas_wgs.shp")
#-----abrindo os fatores de acessibilidade e infraestrutura/ opening the factors of accessibility and
infrastructure-----#
#http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15 #centros urbanos/urban centers
#https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/10m-rivers-lake-centerlines/ #rios
navegaveis/navigable rivers
#https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR #demais fatores/other factors
areas_urbanas <- readOGR("areas_urbanas_br_15.shp")#1
mina_metal <- readOGR("MinaMetálicos.shp") #2
mina_energeticos <- readOGR("MinaEnergéticos.shp")#3
mina_outros <- readOGR("MinaOutrosProdutos.shp")#4
rodovias <- readOGR("rod_trecho_rodoviario_l.shp")#5
ferrovias <- readOGR("ferrovias.shp")#6
linhas_transmissao <- readOGR("LT_EXISTENTE.shp")#7
usina <- readOGR("Usinas_Hidrelétricas_UHE.shp")#8
usina_pequena <- readOGR("Pequenas_Centraís_Hidrelétricas_PCH.shp")#9
rios <- readOGR("ne_10m_rivers_lake_centerlines.shp")#10
data = list(urban = areas_urbanas, mina_m = mina_metal, mina_e = mina_energeticos,mina_o = mina_outros,
           estra = rodovias, ferrov = ferrovias, h_usina = usina, pch = usina_pequena,lin_trans = linhas_transmissao,

```

```

rivers = rios)
#-----função para construção dos modelos/ function for model
construction-----#
#link: https://github.com/azizka/sampbias/blob/master/R/calculate\_bias.R
#link do artigo/link to the article: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ecog.05102
teste <- calculate_bias(
  x = occ, # dados de distribuição das cavernas/cave distribution data
  gaz = data, # fatores de 1 até 10/ factors 1 to 10
  res = 0.05, #0.05= 5km de resolução/ resolution of 5km
  restrict_sample = areas_cavernas, # área de estudo (limite)/ study area(limit)
  terrestrial = TRUE)
#-----projetar o peso dos fatores de viés e a distância/ project the weight of bias factors and
distance-----#
summary(teste)
table_results_v1 <- summary(teste) %>% as.data.frame() #salvar resultados/save results
write.csv(table_results_v1, file = "table_results_v1")
plot(teste) #plotar resultados/plot results
#-----projetar os mapas combinados dos fatores de viés/projecting the combined maps of bias
factors-----#
proj <- project_bias(teste)
map_bias(proj, type = "log_sampling_rate") #salvar todos os mapas/save all maps
map_plot = map_bias(proj, type = "log_sampling_rate")
#-----salvando as projeções separadamente/ saving the projections
separately-----#
r_urban <- proj[[1]]
raster::writeRaster(x = urban,
  filename = "1_r_urban",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)
r_urban_mina_m <- proj[[2]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m,
  filename = "2_r_urban_mina_m",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

```

```

r_urban_mina_m_mina_o <- proj[[3]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o,
  filename = "3_r_urban_mina_m_mina_o",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra <- proj[[4]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra,
  filename = "4_r_urban_mina_m_mina_o_estra",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov <- proj[[5]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov,
  filename = "5_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t <- proj[[6]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t,
  filename = "6_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch <- proj[[7]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch,
  filename = "7_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

```

```

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers <- proj[[8]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers,
  filename = "8_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr <- proj[[9]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr,
  filename = "9_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e <- proj[[10]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e,
  filename = "10_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

#-----FIM/END-----#

```

UMA PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DA RELEVÂNCIA DE CAVERNAS NO BRASIL, COM ÊNFASE EM MORCEGOS

CAVE RELEVANCE CLASSIFICATION IN BRAZIL: A PROPOSAL FOCUSED ON BATS

Jennifer de Sousa Barros

Universidade Federal de Pernambuco Programa
de Pós-Graduação em Biologia Animal
E-mail: jennifer.sbarros@gmail.com

Enrico Bernard

Universidade Federal de Pernambuco
Laboratório de Ciência Aplicada à
Conservação da Biodiversidade
E-mail: enricob2@gmail.com

RESUMO

Ambientes subterrâneos estão entre os ecossistemas mais vulneráveis do planeta. No Brasil, a situação não é diferente e esses ambientes frequentemente se sobrepõem com áreas que experimentam forte pressão antrópica. Até 2008, a legislação brasileira determinava a necessidade de preservação e conservação integral das cavidades naturais e seu entorno como parte do patrimônio espeleológico nacional. Entretanto, os Decretos 6.640/08 e 10.935/22 alteraram esta condição, determinando que cavidades naturais localizadas em áreas de interesse para o desenvolvimento de empreendimentos passem por uma classificação quanto ao seu grau de relevância, enquadrando-as em

ABSTRACT

Underground environments are among the most vulnerable ecosystems on the Earth. The situation is no different in Brazil, where these environments often overlap with areas under strong anthropogenic pressure. Until 2008, Brazilian legislation determined the need for the preservation and integral conservation of natural cavities and their surroundings as part of the national speleological heritage. However, Decrees 6.640/08 and 10.935/22 altered this condition, determining that natural cavities located in areas of interest for the development of enterprises undergo a classification as to their degree of relevance, classifying them as "maximum, high, medium, or low" relevance. At least ten classification attributes directly involve

“máxima, alta, média ou baixa” relevância. Ao menos dez atributos envolvem diretamente o grupo dos morcegos para classificação. Entretanto, de forma geral, tais atributos podem não ser considerados satisfatórios do ponto de vista dos morcegos e carecem de revisão. Assim, tendo como base experiências internacionais de métodos utilizados para priorização de cavernas, uma proposta de protocolo para classificação de relevância de cavernas no Brasil, com foco em morcegos, foi desenvolvida. A versão final do protocolo compreende três classes de proteção e considera os seguintes atributos: 1) Proteção Integral, para a presença de espécies ameaçadas, hot caves, e cavernas com abundância altamente excepcionais; 2) Proteção restritiva, para a presença de colônias maternidade e táxons novos; e 3) Proteção baseada em relevância, para a presença de espécies raras e riqueza de espécies. Atributos de proteção integral classificam automaticamente a caverna como de máxima relevância, atributos de proteção restritiva já seriam suficientes para classificarem as cavernas como de alta relevância, e atributos baseados em relevância são avaliados em conjuntos com demais atributos para classificar a caverna entre baixa, média ou alta relevância. Com essa proposta, esperamos contribuir para o aperfeiçoamento do processo de classificação de relevância de cavidade naturais subterrâneas praticado atualmente no licenciamento ambiental brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Chiroptera, cavernas, conservação, licenciamento ambiental, políticas públicas ambientais.

the bat group. Nevertheless, these attributes may not be considered satisfactory from the bat's point of view and need to be reviewed. Therefore, based on international methods used to prioritize caves, a protocol for classifying the relevance of caves in Brazil, with a focus on bats was developed. The final version of the protocol comprises three classes of protection and considers the following attributes: 1) Full Protection, for the presence of endangered species, hot caves, and caves with highly exceptional abundance; 2) Restrictive Protection, for the presence of maternity colonies and new taxa; and 3) Protection based on relevance, for the presence of rare species and species richness. Full protection attributes automatically classify the cave as being of maximum relevance, restrictive protection attributes would be enough to classify the caves as being of high relevance, and relevance-based attributes are evaluated in conjunction with other attributes to classify the cave as being of low, medium, or high relevance. With this proposal, we hope to contribute to the improvement of the process of classifying the relevance of underground natural cavities currently practiced in Brazilian environmental licensing.

KEYWORDS: Chiroptera, caves, conservation, environmental licensing, environmental public policies.

INTRODUÇÃO

Cavernas são ambientes naturais subterrâneos associados à ausência de luz e estabilidade nas condições de temperatura e umidade (Culver & Pipan, 2009), e que podem abrigar elevada biodiversidade, adaptações extremas em sua biota e alto nível de endemismo (Mammola *et al.*, 2019). Apesar dessas singularidades, em todo o planeta os ecossistemas subterrâneos têm sofrido cada vez mais os efeitos negativos da influência antropogênica (Medellin *et al.*, 2017; Polak & Pipan, 2011), sendo relativamente ainda mais vulneráveis do que outros ecossistemas (Elliott, 2000; Mammola, *et al.*, 2019). Entre os impactos mais comuns estão a mineração, urbanização, poluição, erosão do solo, vandalismo e degradação (Elliott, 2004; Medellin *et al.*, 2017; Mammola *et al.*, 2019).

A situação de pressão sobre os ambientes cavernícolas não é diferente no Brasil. Com dimensões continentais, estima-se que o país abrigue mais de 310.000 cavernas (Auler & Piló, 2011) e a ocorrência desses ambientes frequentemente se sobrepõe com áreas que experimentam forte pressão antrópica. Esta sobreposição é particularmente problemática se considerarmos a extensão e a importância econômica das atividades de setores como o agronegócio e a mineração no Brasil (Siqueira-Gay *et al.*, 2020). Até 2008, a legislação brasileira determinava a necessidade de proteção integral das cavidades naturais e seu entorno como parte do patrimônio espeleológico nacional, e seu uso poderia ocorrer somente dentro de condições específicas, conforme o exposto no Decreto 99556/1990. Entretanto, os Decretos 6.640 de 2008, e 10.935 de 2022 (Brasil, 2008; 2022), alteraram esta condição,

INTRODUCTION

Caves are natural underground environments associated with the absence of light and stable conditions of temperature and humidity (Culver & Pipan, 2009), which can harbor high biodiversity, extreme adaptations in their biota, and a high level of endemism (Mammola et al., 2019). Despite these singularities, all over the planet underground ecosystems have increasingly suffered the negative effects of anthropogenic influence (Medellin et al., 2017; Polak & Pipan, 2011), while being relatively more vulnerable than other ecosystems (Elliott, 2000; Mammola, et al., 2019). Among the most common impacts are mining, urbanization, pollution, soil erosion, vandalism, and degradation (Elliott, 2004; Medellin et al., 2017; Mammola et al., 2019).

The pressure on cave environments is no different in Brazil. With continental dimensions, it is estimated that the country is home to more than 310,000 caves (Auler & Piló, 2011) and the occurrence of these environments often overlaps with areas under strong anthropogenic pressure. This is particularly problematic if the extent and economic importance of agribusiness and mining sector activities in Brazil are considered (Siqueira-Gay et al., 2020). Until 2008, Brazilian legislation determined the need for full protection of natural cavities and their surroundings as part of the national speleological heritage, and their use could only occur under specific conditions, as set out in Decree 9.556/1990. However, Decrees 6.640 of 2008 and 10.935 of 2022 (Brasil, 2008; 2022) altered this condition, determining that natural cavities located in areas of interest for the development of enterprises undergo a classification as to their degree of relevance, classifying them as "maximum, high, medium or low" relevance. Under

determinando que cavidades naturais localizadas em áreas de interesse para empreendimentos passem por uma classificação quanto ao seu grau de relevância, enquadrando-as em “máxima, alta, média ou baixa” relevância. Pelo Decreto 10.935, até mesmo as cavernas de “máxima relevância” poderiam ser objeto de impactos negativos irreversíveis em casos específicos, mediante licenciamento ambiental, e com algum tipo de compensação ambiental (Brasil, 2022), mas este decreto foi parcialmente suspenso por determinação judicial.

Vários atributos são considerados no processo de categorização da relevância das cavernas no Brasil, incluindo aspectos biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob os enfoques local e regional (Brasil, 2008; 2022). Ao menos dez desses atributos envolvem diretamente o grupo dos morcegos (Barros *et al.*, 2020a), o que é pertinente, considerando a riqueza de espécies deste grupo e sua intrínseca relação com cavernas, mas sobretudo considerando a importância que esses animais têm para os ambientes cavernícolas (Fenolio *et al.*, 2006; Gnaspini, 2012). De maneira geral, os morcegos são essenciais na manutenção da diversidade cavernícola, pois contribuem como fonte de recurso energético por meio da deposição de guano (Ferreira *et al.*, 2007), permitindo a existência de toda uma cadeia trófica de invertebrados que dependem direta ou indiretamente dos recursos trazidos pelos morcegos (Gnaspini, 2012). As cavernas, por sua vez, tendem a garantir uma maior estabilidade ambiental em relação ao meio epígeo, além de proteção contra predadores, e desta maneira são consideradas bons abrigos e favorecem a interação social,

Decree 10.935, even caves of “maximum relevance” could be subject to irreversible negative impacts in specific cases, through environmental licensing, and with some kind of environmental compensation (Brasil, 2022), nevertheless this decree was partially suspended by court order.

*Several attributes are considered in the process of categorizing the relevance of caves in Brazil, including biological, geological, hydrological, paleontological, scenic, historical-cultural, and socio-economic aspects, which are assessed from local and regional perspectives (Brasil, 2008; 2022). At least ten of these attributes directly involve the bat group (Barros *et al.*, 2020a), which is pertinent, considering the richness of species in this group and their intrinsic relationship with caves, but above all considering the importance that these animals have for cave environments (Fenolio *et al.*, 2006; Gnaspini, 2012). In general, bats are essential for maintaining cave diversity, as they contribute as a source of energy through guano deposition (Ferreira *et al.*, 2007). This allows for the existence of an entire invertebrates trophic chain that depends directly or indirectly on the resources brought in by bats (Gnaspini, 2012). Caves, in turn, tend to ensure greater environmental stability in relation to the epigeal environment, as well as protection from predators, and are therefore considered good shelters and favor social interaction, reproduction, and parental care for various bat species (Furey & Racey, 2015).*

*Brazil is home to one of the richest bat faunas in the world, with 182 species and nine families registered in the country (Garbino *et al.*, 2020; Garbino *et al.*, 2022). At least 81 of these species use caves as shelter (Guimarães & Ferreira, 2014; Oliveira *et al.*, 2018; Torres & Bichuette, 2019; Barros & Bernard, 2023a). Although high, this number tends to be*

reprodução e o cuidado parental para diversas espécies de morcegos (Furey & Racey, 2015).

O Brasil abriga uma das mais ricas faunas de morcegos do mundo, com 182 espécies e nove famílias registradas no país (Garbino *et al.*, 2020; Garbino *et al.*, 2022). Ao menos 81 destas espécies utilizam cavernas como abrigo (Guimarães & Ferreira, 2014; Oliveira *et al.*, 2018; Torres & Bichuette, 2019; Barros & Bernard, 2023a). Embora elevado, esse número tende a ser efetivamente maior considerando o grande potencial de ocorrência destes ambientes no país e pelo fato de que menos de 10% do território nacional foram minimamente amostrados para morcegos (Bernard *et al.*, 2011; Delgado-Jaramillo *et al.*, 2020).

Apesar da evidente relação entre morcegos e cavernas, poucos são os estudos que utilizam morcegos como elemento focal no processo de seleção de cavernas prioritárias para a conservação (Furman & Ozgul, 2002; Neubaum *et al.*, 2017; Phelps *et al.*, 2016; Tanalgo *et al.*, 2018). Morcegos podem – e em determinados casos devem – ser utilizados como *surrogates* ou guarda-chuvas para a proteção de cavernas. Este é o caso, por exemplo, de cavernas que abrigam espécies de morcegos ameaçadas de extinção (e.g. Delgado-Jaramillo *et al.*, 2018; Tanalgo *et al.*, 2018), e ainda cavernas que abrigam colônias de morcegos com abundâncias excepcionalmente elevadas (Barros & Bernard, 2023b).

Embora a legislação brasileira preveja a necessidade de estudos de impacto ambiental para setores que causam impactos às cavernas – como a mineração, por exemplo (Brasil, 1986) – e embora o país tenha um arcabouço legal que trata especificamente da proteção dos ambientes cavernícolas, alterações na legis-

effectively higher considering the great potential for these environments in the country and the fact that less than 10% of the national territory has been minimally sampled for bats (Bernard et al., 2011; Delgado-Jaramillo et al., 2020).

Despite the obvious relationship between bats and caves, few studies use bats as a central element in the process of selecting priority caves for conservation (Furman & Ozgul, 2002; Neubaum et al., 2017; Phelps et al., 2016; Tanalgo et al., 2018). Bats can, and in certain cases should be used as surrogates or umbrellas to protect caves. This is the case, for caves that are home to endangered bat species (e.g. Delgado-Jaramillo et al., 2018; Tanalgo et al., 2018), and caves that are home to bat colonies with exceptionally high abundances (Barros & Bernard, 2023b).

Brazilian legislation requires environmental impact studies for activities that cause cave impacts, such as mining, for example (Brasil, 1986) In addition, the country has a legal framework that deals specifically with the protection of cave environments. Nevertheless, changes to Brazilian legislation (Brasil, 2008; 2022) and government plans presented for the mining sector (Brasil, 2020) point to the intention or attempt to weaken the rules and procedures surrounding the protection of caves in the country. These changes expose cave ecosystems to irreversible impacts, including the complete destruction of these environments (Bernard et al., 2012; Bernard et al., 2021; Ferreira et al., 2022). Furthermore, the attributes that consider bats in the process of analyzing the relevance of caves, determined in the current legislation (IN 02/2017), are generally not considered satisfactory from a biological point of view and need to be revised (Barros et al., 2020a). Thus, proposals to change the legislation and the attributes used to classify the relevance

lação brasileira (Brasil, 2008; 2022) e a apresentação de planos de governo para o setor mineral (Brasil, 2020) apontam para a intenção ou tentativa de flexibilização de normas e procedimentos que envolvem a proteção das cavernas no país. Estas alterações expõem os ecossistemas cavernícolas a impactos irreversíveis, incluindo a destruição total destes ambientes (Bernard *et al.*, 2012; Bernard *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2022). Adicionalmente, os atributos que consideram morcegos no processo de análise de relevância de cavernas, determinados na legislação vigente (IN 02/2017), de maneira geral não são considerados satisfatórios do ponto de vista biológico e carecem de revisão (Barros *et al.*, 2020a). Assim, propostas de alteração da legislação e dos atributos de classificação da relevância das cavidades brasileiras devem obrigatoriamente ser precedidas de cuidadoso debate técnico-científico, dada a importância do assunto e dos impactos decorrentes que tais alterações podem gerar.

De forma a contribuir com esta discussão, o objetivo do presente estudo foi apresentar uma proposta de atributos relacionados ao grupo Chiroptera, que podem ser considerados em uma eventual revisão da Instrução Normativa 02/17 que norteia a classificação de relevância de cavernas para o Brasil. Neste processo, foi dada ênfase aos morcegos, partindo das normativas já existentes para o país e baseado em iniciativas similares de proposição de atributos de classificação de relevância existentes em outros países, visando sintetizar uma proposta que reúna o rigor científico necessário e justificado, com a objetividade e viabilidade necessárias no processo de licenciamento ambiental.

of Brazilian caves must be preceded by careful technical-scientific debate, given the importance of the subject and the resulting impacts that such changes may generate.

To contribute to this discussion, the aim of this study was to present a proposal for attributes related to the Chiroptera group, which could be considered in a possible revision of Normative Instruction 02/17 (Instrução normativa - IN 02/17), which guides the classification of the relevance of caves in Brazil. In this process, emphasis was placed on bats, based on existing regulations for the country and similar initiatives proposing attributes for the classification of relevance in other countries, to synthesize a proposal that combines the necessary and justified scientific rigor with the objectivity and feasibility required in the environmental licensing process.

MATERIAIS E MÉTODOS

Revisão de literatura

De forma a melhor embasar a discussão sobre atributos de relevância de cavernas no Brasil, realizamos primeiro uma revisão de diferentes métodos disponíveis na literatura científica, especialmente em outros países. Esta abordagem visava identificar a existência de experiências similares fora do Brasil, que pudessem fornecer modelos, sugestões de abordagens ou critérios, úteis em um eventual processo de revisão da própria normativa brasileira. Esta busca apontou a existência de propostas para a Turquia (Furman & Ozgul, 2002), Estados Unidos (Neubaum *et al.*, 2017) e Filipinas (Phelps *et al.*, 2016; Tanalgo *et al.*, 2018). Os métodos utilizados nos estudos internacionais e na IN 02/17 foram avaliados a partir de questões norteadoras, abrangendo cinco eixos principais, e as informações obtidas foram sumarizadas para melhor visualização e avaliação (veja Material suplementar 1, Tabelas Suplementares 1 a 5). Os cinco eixos principais avaliados foram: 1) Legislação, que aborda se/como os países consideram a classificação de cavernas como normas legais; 2) Aspectos Bióticos, que considera atributos relativos à presença de quirópteros nas cavernas; 3) Aspectos Abióticos, que considera características estruturais e ambientais das cavernas (e.g. tamanho das entradas, dificuldade de acesso); 4) Metodologia, que aborda a maneira como os atributos são mensurados e avaliados, e 5) Classificação, que define como as cavernas são categorizadas. Os atributos foram analisados quanto à objetividade e aplicabilidade, em

MATERIALS AND METHODS

Literature review

*To provide better grounds for the discussion on the relevance attributes of caves in Brazil, first a scientific literature review of the different methods available, especially in other countries was carried out. This approach aimed to identify the existence of similar experiences outside Brazil, which could provide models, suggestions for approaches, or criteria, useful in an eventual revision process of the Brazilian regulations. This research revealed the existence of proposals for Turkey (Furman & Ozgul, 2002), the United States (Neubaum *et al.*, 2017), and the Philippines (Phelps *et al.*, 2016; Tanalgo *et al.*, 2018). The methods used in the international studies and in IN 02/17 were evaluated based on guiding questions covering five main axes, and the information obtained was summarized for better visualization and evaluation (see Supplementary Material 1, Supplementary Tables 1 to 5). The five main axes evaluated were: 1) Legislation, which addresses whether/how countries consider the classification of caves as legal norms; 2) Biotic Aspects, which considers attributes related to the presence of chiropterans in caves; 3) Abiotic Aspects, which considers structural and environmental characteristics of caves (e.g. size of entrances, difficulty of access); 4) Methodology, which addresses how attributes are measured and evaluated, and 5) Classification, which defines how caves are categorized. The attributes were analyzed for objectivity and applicability, in relation to their practice in the classification process. Objectivity was considered to be the adoption of clear wording, without dubiousness or subjectivism - i.e. depending on personal interpretations, resulting in different*

relação à sua prática no processo de classificação. Entendemos como objetividade a adoção de uma redação clara, sem dubiedade ou subjetivismo – i.e., que dependesse de interpretações pessoais, resultando em resultados distintos por diferentes pessoas – e que permitisse ao leitor identificar de maneira direta, rápida e fácil qual a proposta em questão e os mecanismos por trás dela. Já a aplicabilidade foi considerada eficiente quando permitia elencar a relevância de diferentes cavernas de maneira direta, otimizada, sem a necessidade de adoção de um número excessivo de etapas, premissas, ou ações quando considerado o grupo dos morcegos.

Proposta de Protocolo para classificação de cavernas

A partir da análise dos atributos utilizados nos estudos identificados, elaboramos uma proposta de protocolo de classificação de cavernas prioritárias para conservação. Para a elaboração da proposta, além dos estudos internacionais já mencionados, foi considerada ainda uma revisão crítica com foco em morcegos da IN 02/2017, realizada por um grupo de especialistas do Brasil (Barros *et al.*, 2020a). Nesta primeira versão, de dezembro de 2021, foram incluídos os seguintes atributos: 1) Presença de espécies ameaçadas; 2) Presença de colônias maternidades; 3) *Hot caves*; 4) Colônias excepcionais em tamanho; 5) *Taxa* novos; 6) Riqueza de espécies; 7) Presença de espécies Raras; 8) Abundância relativa; e 9) Atributos de vulnerabilidade.

Ainda que as experiências internacionais forneçam uma boa base para determinação de atributos a serem utilizados para classificação de cavernas, é necessário que tais atri-

results for different people - and allowing the reader to directly, quickly, and easily identify the proposal in question and its mechanisms. Applicability was considered efficient when it allowed the relevance of different caves to be listed in a direct, optimized way, without the need to adopt an excessive number of steps, premises, or actions when considering the bat group.

Proposed protocol for cave classification

*Based on the analysis of the attributes used in the identified studies a protocol proposal for classifying priority caves for conservation was drawn. To prepare the proposal, in addition to the international studies already mentioned, a critical review of IN 02/2017 focusing on bats carried out for a group of Brazilian experts (Barros *et al.*, 2020a) was also considered. In this first version, from December 2021, the following attributes were included: 1) Presence of threatened species; 2) Presence of maternity colonies; 3) *Hot caves*; 4) Exceptional size colonies; 5) *New taxa*; 6) Species richness; 7) Presence of Rare species; 8) Relative abundance; and 9) Vulnerability attributes.*

Although international experiences provide a good basis for determining the attributes to be used for classifying caves, it is necessary that these attributes be applied in a way that is consistent with the reality of bat species in Brazil (e.g., high bat species richness, high availability of caves, distri-

butos sejam aplicados de forma coerente com a realidade das espécies de morcegos do Brasil (e.g. elevada riqueza de espécies de morcegos, elevada disponibilidade de cavernas, distribuição de espécies em dimensões continentais). Com intuito de colher opiniões da comunidade técnico-científica na discussão, a primeira versão dessa proposta de protocolo foi encaminhada (em dezembro de 2021) para apreciação de 15 especialistas de diferentes áreas, incluindo profissionais envolvidos com órgãos ambientais responsáveis e fiscalizadores do licenciamento ambiental, biólogos consultores e pesquisadores das áreas de quirópteros e espeleologia (Veja Agradecimentos).

Após o retorno de comentários pelos especialistas consultados, elaboramos então uma segunda versão revisada e atualizada do protocolo de classificação, apresentada aqui. Atributos abióticos que avaliam a influência de atividades antrópicas sobre as cavernas foram considerados sem significativa contribuição no âmbito do licenciamento ambiental, de forma que não foram incluídos na proposta de classificação revisada. Os atributos que foram mantidos foram adequados levando em consideração ambos os Decretos 6.640/08 e 10.935/22, uma vez que suas atualizações ainda estão em tramitação nas instâncias governamentais responsáveis. A determinação de aplicação de alguns atributos, nomeadamente riqueza de espécies, presença de populações excepcionais em tamanho, e presença de espécies raras, foi baseada em estudos complementares (veja Barros, 2022).

tribution of species over continental dimensions). In order to gather opinions from the technical-scientific community in the discussion, the first version of this protocol proposal was sent (in December 2021) to 15 specialists from different areas, including professionals involved with environmental agencies responsible for overseeing environmental licensing, biology consultants, and researchers in the areas of Chiroptera and speleology (See Acknowledgments).

Following feedback from the consulted experts, a second revised and updated version of the classification protocol was drawn up and is presented here. Abiotic attributes that assess the influence of anthropogenic activities on caves were not considered to make a significant contribution in the context of environmental licensing, thus they were not included in the revised classification protocol. The attributes that were maintained were adjusted considering both Decrees 6.640/08 and 10.935/22, since their updates are still being processed by the responsible government bodies. The determination of the application of some attributes, namely species richness, the presence of populations exceptional in size, and the presence of rare species, was based on complementary studies (see Barros, 2022).

RESULTADOS

Avaliação e síntese de experiências internacionais

Os cinco métodos de classificação de relevância de cavernas identificados e avaliados apresentaram diferenças em todos os cinco eixos norteadores (Material suplementar 1 – Tabelas Suplementares 1 a 5). Tais diferenças foram assim sintetizadas:

Legislação: Dentre os estudos avaliados, apenas o realizado nos Estados Unidos (Neubaum *et al.*, 2017) menciona a existência de legislação específica, sumarizando as iniciativas já utilizadas pelos órgãos ambientais daquele país. Os estudos da Turquia (Furman & Ozgul, 2002) e ambos os estudos nas Filipinas (Phelps *et al.*, 2016; Tanalgo *et al.*, 2018) são focados apenas na pesquisa científica com fins conservacionistas.

Aspectos bióticos (consideram riqueza, abundância, presença de espécies endêmicas e/ou ameaçadas): O estudo que mais diferiu neste aspecto foi o de Tanalgo e colaboradores (2018), realizado nas Filipinas, uma vez que considerou frequência de ocorrência das espécies, quesito não avaliado nos outros quatro estudos. Mais além, ao invés da utilização da presença ou ausência de espécies endêmicas ou ameaçadas, estes autores atribuíram pontuações para estas espécies. Os estudos realizados em regiões temperadas (EUA e Turquia) incluíram ainda em suas avaliações os diferentes tipos de usos que os morcegos podem fazer da caverna (i.e., hibernáculo e/ou maternidade), o que para as espécies dessas regiões é bastante característico. O diferencial da IN 02/2017 brasileira em relação aos aspectos bióticos é que esta norma

RESULTS

Evaluation and synthesis of international experiences

The five relevance classification methods for caves that were identified differed in all five areas (Supplementary Material 1 - Supplementary Tables 1 to 5). These differences have been summarized as follows:

Legislation: Among the studies evaluated, only the one carried out in the United States (Neubaum *et al.*, 2017) mentions the existence of specific legislation, summarizing the initiatives already used by environmental agencies in that country. The studies in Turkey (Furman & Ozgul, 2002) and both studies in the Philippines (Phelps *et al.*, 2016; Tanalgo *et al.*, 2018) focused only on scientific research for conservation purposes.

Biotic aspects (considers richness, abundance, presence of endemic and/or threatened species): The study carried out in the Philippines by Tanalgo *et al.* (2018), was the one that differed the most in this respect, it considered the frequency of occurrence of species, an item not assessed in the other four studies. Furthermore, instead of using the presence or absence of endemic or threatened species, these authors assigned scores to these species. The studies carried out in temperate regions (USA and Turkey) also included in their assessments the different types of uses that bats can make of the cave (i.e., hibernacula and/or maternity), which for species from these regions is quite characteristic. What sets Brazil's IN 02/2017 apart from the biotic aspects is that it also considers the ecological importance of the species and possible long-lasting, rare, or unusual ecological interactions.

considera também a importância ecológica das espécies e possíveis interações ecológicas duradouras, raras ou incomuns.

Aspectos abióticos: não foram considerados nas avaliações da Turquia e EUA. Nas Filipinas, Tanalgo e colaboradores (2018) consideraram atributos físicos e ambientais das cavernas que podem facilitar a influência antrópica sobre elas, e consequentemente impactar as comunidades de morcegos, tais como acessibilidade, esforço de exploração, tamanho das entradas e os diferentes usos antrópicos possíveis para a caverna. Também nas Filipinas, o estudo de Phelps *et al.* (2016) baseou a classificação de relevância em características das cavernas, tanto estruturais (e.g. complexidade e tamanho) quanto em diferentes tipos de impactos e influência antrópica.

Metodologia: A maneira utilizada para coleta de dados bióticos foi semelhante em todos os estudos, com a captura dos morcegos realizada através de redes-de-neblina e puçás. Ambos os estudos realizados nas Filipinas não consideraram amostragens sazonais, enquanto os outros sugeriram a realização de pelo menos uma amostragem em cada estação. A diferença neste quesito está nos índices criados e utilizados para sumarizar a informação e transformá-la em diferentes classes de relevância. Nas Filipinas, Phelps *et al.* (2016) não criou índices bióticos, mas avaliou os diferentes níveis de perturbação na caverna, enquanto Tanalgo *et al.* (2018) utilizaram um índice de potencial biótico e um índice de vulnerabilidade para compor o índice final de classificação. Na IN 02/2017, o índice gerado considera todos os atributos presentes nas cavernas avaliadas, e leva em conta as escalas local e regional. No estudo de Furman & Ozgul (2002), na Turquia, o índice gerado foi apenas biótico e considerou a abun-

Abiotic aspects: In the assessments in Turkey and in the USA, these were not considered. In the Philippines, Tanalgo et al. (2018) considered the physical and environmental attributes of caves that can facilitate anthropogenic influence on them, and consequently impact bat communities, such as accessibility, exploration effort, size of entrances, and the different possible anthropogenic uses for the cave. Also in the Philippines, the study by Phelps et al. (2016) based the relevance classification on cave characteristics, both structural (e.g., complexity and size) and on different types of impacts and anthropic influence.

Methodology: The method used to collect biotic data was similar in all the studies, with bats being captured using mist nets and hand nets. Both studies carried out in the Philippines did not consider seasonal sampling, while the others suggested carrying out at least one sample each season. The difference in this regard lies in the indices created and used to summarize the information and transform it into different classes of relevance. In the Philippines, Phelps et al. (2016) did not create biotic indices, but assessed the different levels of disturbance in the cave, while Tanalgo et al. (2018) used a biotic potential index and a vulnerability index to make up the final classification index. In the IN 02/2017, the index generated considers all the attributes present in the caves assessed and takes into account the local and regional scales. In the study by Furman & Ozgul (2002), in Turkey, the index generated was only biotic and considered the abundance of species multiplied by the score referring to their conservation status. In the study by Neubaum et

dância das espécies multiplicada pelo score referente a seu status de conservação. No estudo de Neubaum *et al.* (2017), nos EUA, a avaliação foi feita considerando a porcentagem da população local de morcegos afetada pelos impactos na caverna e com a densidade estimada de abrigos. A análise da paisagem foi levada em consideração nos estudos dos EUA e nas Filipinas, entretanto apenas Phelps *et al.* (2016) determinam uma área de influência para as cavernas, considerando esta área como 1 km.

Classificação: A aplicação dos índices gerados (e.g. presença de espécies ameaçadas, vulnerabilidade a impactos, abundância) resulta na classificação final que indica a necessidade ou não de proteção das cavernas. Furman e Ozgul (2002), na Turquia, geram uma classificação numérica, enquanto em todos os outros países a classificação é categórica, embora nas Filipinas, Tanalgo *et al.* (2018) utilizem classes numéricas e categóricas em sua classificação final.

Protocolo proposto para classificação de cavernas com base em morcegos

A análise dos estudos na fase anterior permitiu uma comparação de diferentes abordagens e sugestões para a classificação de relevância das cavernas. Os critérios, atributos e processos adotados são úteis para entender se e quais opções existem fora do Brasil, permitindo avaliar como a abordagem descrita na normativa brasileira se situa em relação às experiências similares fora do Brasil. Considerando a análise previamente apresentada das propostas de classificação de relevância, a próxima etapa deste estudo foi a elaboração de uma proposta de um protocolo para a classificação de relevância de cavernas que pudesse reunir os pontos posi-

al. (2017), in the USA, the assessment was made considering the percentage of the local bat population affected by the impacts on the cave and the estimated density of shelters. Landscape analysis was considered in the US and Philippine studies, however, only Phelps *et al.* (2016) determine an area of influence for caves, considering this area to be 1 km.

Classification: The application of the generated indices (e.g., presence of endangered species, vulnerability to impacts, abundance) results in the final classification that indicates whether or not the caves need to be protected. In Turkey, Furman and Ozgul (2002) generated a numerical classification, while in all other countries, the classification is categorical. Notwithstanding, Tanalgo *et al.* (2018) used numerical and categorical classes in their final classification in the Philippines.

Proposed protocol for classifying caves based on bats

The analysis of the studies in the previous phase allowed a comparison of different approaches and suggestions for classifying the relevance of caves. The criteria, attributes, and processes adopted are useful for understanding whether options exist outside Brazil, and which are those. This analysis allowed us to assess how the approach described in the Brazilian regulations stands in relation to similar experiences outside Brazil. Considering what was previously presented of the proposals for classifying relevance, the next step in this study was to draw up a protocol for classifying the relevance of caves that could bring together the positive points found in the interna-

tivos encontrados nas experiências de outros países e corrigir problemas identificados previamente na IN 02/2017 (veja Barros *et al.* 2020a). Mas considerando que já existe uma normativa legal vigente no Brasil, a proposta aqui elaborada partiu da classificação determinada na legislação protetiva de cavernas do Brasil (Brasil, 2008; 2022). Assim, a classificação final aqui proposta manteve a nomenclatura adotada para as cavernas como “Máxima, Alta, Média e Baixa” relevância (Figura 1). Entretanto, adequamos os atributos de forma a compor três grandes níveis de proteção:

a) Proteção integral – composto por atributos que automaticamente classificam a caverna como de Máxima Relevância.

b) Proteção restritiva – composto por atributos que sozinhos já seriam suficientes para classificar a caverna como sendo de Alta Relevância. Tais atributos impõem proteção integral temporária, impedindo que a caverna sofra impactos negativos irreversíveis até que as restrições sejam sanadas. Para estes atributos, impactos só poderiam ser permitidos mediante a compensação com outras cavernas com as mesmas características/atributos/espécies sem a possibilidade da aplicação de “outras formas de compensação”.

c) Proteção baseada em relevância – composto por atributos que, avaliados em conjunto com os demais atributos bióticos, permitem classificar a caverna em Baixa, Média ou Alta Relevância, e que podem permitir impactos negativos mediante algum tipo de compensação.

*tional experiences and correct previously identified problems in the IN 02/2017 (see Barros *et al.* 2020a). However, considering that there is already a legal regulation in force in Brazil, the proposal made here was based on the classification determined in Brazilian cave protection legislation (Brasil, 2008; 2022). Thus, the final classification maintained the nomenclature adopted for caves as “Maximum, High, Medium, and Low” relevance (Figure 1). Nevertheless, the attributes to make up three major levels of protection were adjusted:*

a) Full protection - composed of attributes that automatically classify the cave as being of Maximum Relevance.

b) Restrictive protection - made up of attributes that alone would be enough to classify the cave as being of High Relevance. These attributes impose temporary full protection, preventing the cave from suffering irreversible negative impacts until the restrictions are remedied. For these attributes, impacts could only be allowed through compensation with other caves with the same characteristics/attributes/species, without the possibility of applying “other forms of compensation”.

c) Protection based on relevance - made up of attributes which, when assessed together with the other biotic attributes, allow the cave to be classified as Low, Medium or High Relevance, and which can allow negative impacts through some kind of compensation.

A seguir, apresentamos cada uma das categorias e seus respectivos atributos, incluindo o contexto que justifica a classificação proposta e, quando necessário, definições, instruções de aplicação, e sugestões de redação que, se adotadas, tornariam uma futura Instrução Normativa sobre o assunto mais clara e objetiva.

1. Proteção Integral – Cavernas de Máxima Relevância

1.1 Atributo: Abrigo essencial para a preservação de populações de espécies animais em risco de extinção, constantes de listas oficiais (Brasil, 2022).

Contexto: Este atributo é válido e já avaliado pela Instrução Normativa 02/17, no entanto, sua redação deve ser exata para evitar o uso de interpretações equivocadas, por vezes prejudiciais à conservação de espécies ameaçadas (Barros *et al.*, 2020a). Segundo a Portaria N° 148 de 7 de junho de 2022 (Brasil, 2022) as espécies constantes na Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção gozam de prerrogativa de proteção integral, sendo proibida sua captura, transporte, armazenamento, guarda, manejo, beneficiamento e comercialização. A proteção do habitat natural, e consequentemente dos abrigos utilizados por essas espécies, atende aos requisitos legais da Política Nacional do Meio Ambiente que visa à orientação de ações para retirada das espécies das listas vermelhas. No caso de algumas espécies de morcegos ameaçadas, como *N. macrourus* e *F. horrens*, é justamente a relação com as cavernas, e devido às pressões a que os ambientes subterrâneos estão submetidos, que determinam seu status de ameaça (MMA, 2022). É importante que o conceito deste atributo na IN fique extremamente claro garantindo que apenas a

Below, each of the categories and their respective attributes are presented. It includes the context that justifies the proposed classification and, where necessary, definitions, application instructions, and drafting suggestions that, if adopted, would make a future Normative Instruction on the subject clearer and more objective.

1. Integral Protection - Caves of Maximum Relevance

1.1 Attribute: Essential shelter for the preservation of populations of endangered animal species on official lists (Brazil, 2022).

Context: This attribute is valid and has already been assessed by IN 02/17, however, its wording must be precise to avoid the use of misinterpretations, which are sometimes detrimental to the conservation of endangered species (Barros *et al.*, 2020a). According to Ordinance No. 148 of June 7, 2022 (Brasil, 2022), the species on the Official National List of Endangered Fauna Species are fully protected, and their capture, transportation, storage, safekeeping, handling, processing and sale are prohibited. Protecting the natural habitat, and consequently the roosts used by these species, meets the legal requirements of the National Environmental Policy, which aims to guide actions to remove species from red lists. In the case of some threatened bat species, such as *N. macrourus* and *F. horrens*, it is precisely their relationship with caves, and the pressures to which underground environments are subjected, that determine their threatened status (MMA, 2022). It is important that the concept of this attribute in the IN is made extremely clear, ensuring that the mere presence of threatened species on official lists is enough to classify them as being of Maximum Relevance.

presença de espécies ameaçadas constantes em listas oficiais já é suficiente para sua classificação como de Máxima Relevância. No Brasil, a atual lista vigente (MMA, 2022) considera oficialmente como ameaçadas de extinção as espécies de morcegos *Furipterus horrens*, *Natalus macrourus*, *Lonchophylla dekeyseri*, e *Lonchophylla bokermanii*. Além disso, atualmente os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Pará e Bahia dispõem de listas oficiais estaduais (Barros et al., 2020a) e, portanto, nesses estados, cavernas com a presença de espécies ameaçadas constantes nas listas estaduais também devem ser consideradas para proteção integral.

Sugestão de redação para uma nova IN: Cavernas com o registro de espécies ameaçadas de extinção constantes em listas oficiais (Nacional ou Estaduais) de espécies da fauna ameaçadas de extinção.

1.2 Atributo: Cavidade considerada abrigo essencial para manutenção permanente de congregação excepcional de morcegos, com no mínimo, dezenas de milhares de indivíduos, e que tenha a estrutura trófica climática de todo o seu ecossistema modificada e condicionada à presença dessa congregação (Brasil, 2022).

Contexto: A definição do atributo foi recentemente modificada pelo Decreto 10.935/2022 e não pode ser alterada, uma vez que por prerrogativa legal o atual decreto só pode ser alterado por outro decreto ou lei. Entretanto, a definição presente na Instrução Normativa deveria englobar e explicitar dois casos distintos: 1) *Hot caves* e 2) Colônias excepcionais em tamanho. Colônias com abundâncias altamente excepcionais de indivíduos possuem importante papel

*In Brazil, the current list (MMA, 2022) officially considers the bat species *Furipterus horrens*, *Natalus macrourus*, *Lonchophylla dekeyseri*, and *Lonchophylla bokermanii* to be threatened with extinction. In addition, the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Pará, and Bahia currently have official state lists (Barros et al., 2020a) and, therefore, in these states, caves with the presence of threatened species on the state lists should also be considered for full protection.*

Suggested wording for a new IN: *Caves with a record of endangered species on official lists (National or State) of endangered fauna species.*

1.2 Attribute: Cave considered an essential roost for the permanent maintenance of an exceptional congregation of bats, with at least tens of thousands of individuals. In addition, to having the climatic trophic structure of its entire ecosystem modified and conditioned to the presence of this congregation (Brazil, 2022).

Context: *The definition of the attribute was recently modified by Decree 10.935/2022 and cannot be changed, since by legal prerogative the current decree can only be changed by another decree or law. However, the definition in the Normative Instruction should encompass and explain two distinct cases: 1) *Hot caves* and 2) Colonies that are exceptional in size. Colonies with highly exceptional abundance of individuals play an important ecological role in the underground ecosystem.*

ecológico no ecossistema subterrâneo, e atualmente a legislação vigente no Brasil (Brasil, 2017; 2022) gera margem para que essas cavernas sejam desconsideradas no atributo dedicado a grandes congregações, permitindo impactos negativos irreversíveis mediante compensação, o que resulta em danos incomensuráveis para tais populações (Barros *et al.*, 2020a). O caráter de “manutenção permanente”, citado no atual Decreto 10.935/2022, não deve ser interpretado como a presença permanente e constante dessas grandes congregações em determinada caverna. O uso de cavernas por algumas espécies e populações de morcegos é dinâmico, sendo frequente a utilização e movimento entre mais de uma caverna (Leal & Bernard, 2021; Otálora-Ardila *et al.*, 2019). Assim, manutenção permanente deve ser interpretada como uso contínuo ao longo do tempo, de forma que a proteção dessas cavernas deve ser garantida, mesmo que a população se ausente da caverna por alguns períodos. Propomos aqui que a excepcionalidade em tamanho deve ser considerada para cavernas que apresentem colônias com abundância estimada, calculada ou inferida igual ou maior do que cinco vezes a média regional. Esta proposta é objetiva, quantitativa, mensurável, e baseia-se na análise de informações disponíveis sobre populações de morcegos em caverna brasileiras (veja Barros, 2022; Barros & Bernard, 2023a).

Definições: *Hot caves* são cavernas caracterizadas por um ambiente com altas temperaturas (28°C a 40°C) geradas pelo calor corporal emanado por morcegos de algumas espécies quando em altas densidades (milhares de indivíduos), ou ainda pela decomposição do guano produzido por estes morcegos. *Hot caves* geralmente possuem uma única entrada relativamente pequena, baixa

Current Brazilian legislation (Brasil, 2017; 2022) leaves room for these caves to be disregarded in the attribute dedicated to large congregations, which allows irreversible negative impacts through compensation, resulting in immeasurable damage to such populations (Barros et al., 2020a). The character of “permanent maintenance”, mentioned in the current Decree 10.935/2022, should not be interpreted as the permanent and constant presence of these large congregations in a given cave. The use of caves by some bat species and populations is dynamic, with frequent use and movement between more than one cave (Leal & Bernard, 2021; Otálora-Ardila et al., 2019). Thus, permanent maintenance should be interpreted as continuous use over time, so that the protection of these caves must be guaranteed, even if the population is absent from the cave for some periods. It is proposed here that exceptionality in size should be considered for caves that have colonies with estimated, calculated, or inferred abundance equal to or greater than five times the regional average. This proposal is objective, quantitative, measurable, and based on an analysis of the information available on bat populations in Brazilian caves (see Barros, 2022; Barros & Bernard, 2023a).

Definitions: *Hot caves* are caves characterized by high temperatures environments (28°C to 40°C) generated by the body heat emanated by bats of some species when in high densities (thousands of individuals), or by the decomposition of the guano produced by these bats. *Hot caves* generally have a single, relatively small entrance, low air circulation, and relative humidity of over 90% (Ladle et

circulação de ar, e umidade relativa maior que 90% (Ladle *et al.*, 2012). No Brasil, tais cavernas ocorrem principalmente pela presença das espécies do gênero *Pteronotus* (Rocha, 2013).

Sugestão de redação para uma nova IN: Cavernas identificadas como *hot caves* e/ou com a presença de colônias de morcegos excepcionais em tamanho.

Instruções de aplicação: No caso de colônias excepcionais em tamanho, as cavernas devem ser avaliadas nos contextos local e regional. Assim, serão consideradas colônias excepcionais em tamanho aquelas cavernas que possuírem o número de indivíduos igual ou maior do que cinco vezes a média regional. Nos casos em que não existam dados regionais disponíveis, a análise deve ser realizada com os dados locais. Entretanto, uma vez que tal excepcionalidade pode variar de acordo com diferentes espécies, propomos ainda a elaboração de uma base contendo os dados de abundância de grandes congregações de morcegos já conhecidas no Brasil, bem como dados de monitoramentos contínuos, o que permitiria uma melhor caracterização de excepcionalidade por abundância. Tal base poderá ser realizada nos mesmos moldes da lista de espécies de morcegos do Brasil (Garbino *et al.*, 2020), podendo ser também idealizada e atualizada pela Sociedade Brasileira para o Estudo dos Quirópteros (SBEQ).

al., 2012). In Brazil, such caves occur mainly due to the presence of species of the *Pteronotus* genus (Rocha, 2013).

Suggested wording for a new IN: Caves identified as *hot caves* and/or with the presence of exceptional size bat colonies.

Instructions for use: In the case of colonies that are exceptional in size, the caves must be assessed in both local and regional contexts. Thus, caves with a number of individuals equal to or greater than five times the regional average will be considered exceptional size colonies. In cases where no regional data is available, the analysis should be carried out using local data. However, since such exceptionality can vary according to different species, the creation of a database containing abundance data from large bat congregations already known in Brazil is recommended, as well as data from continuous monitoring, which would allow for a better characterization of exceptionality by abundance. This database could be created along the same lines as the list of bat species in Brazil (Garbino *et al.*, 2020), and could also be designed and updated by the Brazilian Society for Chiroptera Study (Sociedade Brasileira para o Estudo dos Quirópteros - SBEQ).

2. Proteção Restritiva – atributos que, sozinhos, poderiam classificar a cavidade como de Alta relevância, e impedem que a caverna sofra impactos negativos irreversíveis até que certas restrições sejam sanadas. Tais impactos só serão permitidos mediante compensação com outras cavernas com atributos equivalentes, sem a possibilidade de “outras formas de compensação”.

2.1 Atributo: Colônia Maternidade

Contexto: Filhotes não possuem habilidades termoregulatórias bem desenvolvidas e se beneficiam de estar em grupo devido ao aumento do calor resultante do contato corporal direto entre eles (Zagmajister, 2019). Geralmente a disponibilidade de abrigos com condições microclimáticas ótimas para criação dos filhotes é limitada, e a formação de colônias maternidade pode favorecer diferentes espécies de morcegos (Zagmajister, 2019). Assim é comum observar ainda a fidelidade de fêmeas a abrigos favoráveis à proteção de seus filhotes até seu crescimento (Lewis, 1995). Dessa forma, a presença de grupos de fêmeas grávidas e/ou com filhotes em determinadas cavernas pode indicar que tais abrigos são essenciais para a sobrevivência e recrutamento das novas gerações, sendo sua conservação de fundamental importância.

Definição: Colônia maternidade é aquela formada por fêmeas grávidas e/ou com filhotes, para o nascimento da prole ou para os cuidados pós-nascimento dos filhotes (Neubaum *et al.*, 2017).

Sugestão de redação para uma nova IN: Caverna com a presença de colônias maternidade, composto por grupo de fêmeas grávidas e/ou com filhotes.

2. Restrictive Protection - attributes which, on their own, could classify the cave as of High Relevance, and prevent the cave from suffering irreversible negative impacts until certain restrictions are remedied. Such impacts will only be allowed through compensation with other caves with equivalent attributes, without the possibility of “other forms of compensation”.

2.1 Attribute: Maternity Colony

Context: Offsprings do not have well-developed thermoregulatory abilities and benefit from being in groups due to the heat increase resulting from direct body contact between them (Zagmajister, 2019). In general, roost availability with optimal microclimatic conditions for raising young is limited, and the formation of maternity colonies can favor different bat species (Zagmajister, 2019). It is also common to observe the females' fidelity to roosts that are favorable for protecting their young until they grow up (Lewis, 1995). Thus, the presence of pregnant female groups and/or females with young in certain caves may indicate that these roosts are essential for the survival and recruitment of new generations and that their conservation is of fundamental importance.

Definition: A maternity colony is one formed by pregnant females and/or females with offspring, for the birth of the offspring or for the post-birth care of the offspring (Neubaum *et al.*, 2017).

Suggested wording for a new IN: Cave with the presence of maternity colonies, composed of a group of pregnant females and/or with offspring.

Instruções de aplicação: O censo de fêmeas grávidas ou com filhotes deve ser implementado como metodologia padrão e obrigatória durante todos os estudos de análise de relevância em cavidades naturais. As cavernas devem ser avaliadas em um contexto local. Assim, serão consideradas como maternidade aquelas cavernas que apresentarem o número de fêmeas grávidas e/ou com filhotes três vezes maior do que a média local. Para as cavernas identificadas como colônias maternidade, sua proteção deve ser garantida e devem ser implementados monitoramentos de longo prazo, a fim da obtenção de informações de uso dessas cavernas e futura reclassificação, se pertinente. Em cavernas nas quais forem registradas a presença de fêmeas grávidas e/ou com filhotes em número reduzido (cavernas não identificadas como colônias maternidade), a proteção deve ser garantida até o nascimento dos filhotes e até que estes completem seu desenvolvimento inicial, quando atingirem o momento em que são capazes de voar sozinhos, respeitando ainda os ciclos sazonais de cada espécie.

2.2 Atributo: Táxons novos

Contexto: Esse atributo já é avaliado na instrução normativa vigente no Brasil, e é especialmente válido para os casos de cavernas para as quais as cláusulas de sigilo, presentes no processo de licenciamento, embargam ou retardam a publicidade e descrição dos novos táxons, permitindo que impactos negativos irreversíveis ocorram antes da completa descrição da espécie. Porém, na prática, ao menos no que tange aos morcegos, a aplicação é falha, uma vez que muitas vezes as metodologias utilizadas nos estudos de impacto ambientais falham em acessar e diagnosticar

Instructions for use: The census of pregnant females or females with offspring should be implemented as a standard and mandatory methodology during all relevance analysis studies in natural caves. Caves must be assessed in a local context. Thus, caves with three times the number of pregnant females and/or with offspring than the local average will be considered maternity caves. For caves identified as maternity colonies, their protection must be guaranteed, and long-term monitoring must be implemented in order to obtain information on the use of these caves and future reclassification, if pertinent. In caves where the presence of pregnant females and/or caves with small numbers of offspring (caves not identified as maternity colonies) is recorded, protection should be guaranteed until the offspring are born and until they complete their initial development, that is, when they are able to fly on their own, while also respecting the seasonal cycles of each species.

2.2 Attribute: New taxa

Context: This attribute is already assessed in the current legislation in Brazil and is especially valid in the case of caves for which secrecy clauses in the licensing process hinder or delay the report and description of new taxa, allowing irreversible impacts to occur before the species is fully described. Nevertheless, at least where bats are concerned, the application is flawed in practice, since the methodologies used in environmental impact studies often fail to correctly access and diagnose biodiversity (Dias et al., 2022). In addition, these taxa may correspond to species that are

de maneira correta a biodiversidade (Dias *et al.*, 2022). Além disso, tais *taxa* podem corresponder a espécies ameaçadas de extinção em algum grau, de forma que tais cavernas teriam o direito à proteção integral.

Definição: Presença de animais pertencentes a *taxa* ainda não descritos na literatura.

Instruções de aplicação: Ficam vetados impactos negativos na caverna até a descrição científica formal do *taxon* e a avaliação de seu status de ameaça.

3. Proteção Baseada em Relevância - atributos que permitem a classificação das cavernas em baixa, média ou alta relevância.

3.1 Atributo: Espécies raras

Contexto: Diferentes espécies possuem requerimentos específicos para a escolha de seus abrigos (Barros *et al.*, 2020b). Dessa forma, espécies raras podem apresentar alta seletividade para escolha de cavernas, como no caso de espécies essencialmente cavernícolas. Sendo assim, cavernas com a presença de espécies raras essencialmente cavernícolas podem apresentar características específicas que propiciam condições favoráveis à ocorrência dessas espécies, o que qualifica estas cavernas como relevantes para conservação.

Definição: Presença de espécies raras na caverna. O cálculo para avaliação de espécies raras deverá ser realizado através da razão entre a frequência de ocorrência da espécie e o número de cavernas amostradas na região:

$$\text{Índice de Raridade (IR)} = N/f$$

threatened with extinction to some degree, so these caves would be entitled to full protection.

Definition: Presence of animals belonging to *taxa* not yet described in the literature.

Instructions for use: Negative impacts on the cave are prohibited until the taxon has been formally scientifically described and its threat status assessed.

3. Relevance-based protection - attributes that allow caves to be classified as low, medium, or high relevance.

3.1 Attribute: Rare species

Context: Different species have specific requirements for choosing their roosts (Barros *et al.*, 2020a). Therefore, rare species can be highly selective in their choice of caves, as in the case of essentially cave-dwelling species. Moreover, caves with the presence of rare essentially cave-dwelling species may have specific characteristics that provide favorable conditions for their occurrence, which qualifies these caves as relevant for conservation.

Definition: Rare species presence in the cave. The calculation for evaluating rare species should be made using the ratio between the frequency of occurrence of the species and the number of caves sampled in the region:

$$\text{Rarity Index (RI)} = N/f$$

onde N é o número de cavernas e f é a frequência de ocorrência da espécie. Valores maiores que 4.00 indicam que a espécie é rara ou ocorre apenas em algumas cavernas (ocorrência em $\leq 25\%$ das cavernas) e valores próximos a 1.00 indicam que a espécie é comum na maioria das cavernas.

Sugestão de redação para uma nova IN: Presença de espécies registradas em apenas 25% ou menos das cavernas amostradas no contexto local ou regional, avaliadas conforme o tipo de uso que fazem das cavernas.

Instruções de aplicação: A presença de espécies raras deve ser avaliada nos contextos local e regional, conforme as definições de escalas estabelecidas na IN 02/17. A determinação de uma espécie rara deve levar em consideração a frequência com que as espécies ocorrem nas cavernas amostradas (Tanalgo *et al.*, 2018). Quando existirem dados disponíveis em nível regional a análise deve ser realizada com tais dados, nos casos em que não existam dados regionais disponíveis, a análise deve ser realizada com os dados locais. Cavernas com espécies raras essencialmente cavernícolas (EC) devem ser pontuadas como de alta relevância; cavernas com espécies raras usualmente cavernícolas (UC) devem ser classificadas com média relevância; e cavernas com espécies raras ocasionalmente cavernícolas (OC) devem ser pontuadas como baixa relevância. Uma lista inicial de referência para ocorrência e uso de espécies de morcegos em cavernas no Brasil pode ser encontrada em Barros (2022) e Barros e Bernard (2023a). Alguns estudos disponíveis resumem a informação conhecida a respeito da ocorrência de morcegos em cavernas no Brasil, sendo possível encontrar dados que podem servir de base como informação em nível

where N is the number of caves and f is the frequency of occurrence of the species. Values greater than 4.00 indicate that the species is rare or only occurs in a few caves (occurrence in $\leq 25\%$ of caves) and values close to 1.00 indicate that the species is common in most caves.

Suggested wording for a new IN: Presence of species recorded in 25% or less of the caves sampled in the local or regional context, assessed according to the type of cave use they make.

Instructions for use: The presence of rare species must be assessed in local and regional contexts, according to the scale definitions established in the IN 02/17. The determination of a rare species must consider the frequency with which the species occurs in the sampled caves (Tanalgo *et al.*, 2018). If regional data are available, the analysis should be carried out using such data; if regional data are not available, the analysis should be carried out using local data. Caves with rare primarily cave-dwelling (PC) species should be classified as high relevance; caves with rare regularly cave-dwelling (RC) species should be classified as medium relevance; and caves with rare occasionally cave-dwelling (OC) species should be classified as low relevance. A first reference list for the occurrence use of bat species in Brazilian caves can be found in Barros (2022), Barros, and Bernard (2023a). Some studies summarize the information known about the occurrence of bats in Brazilian caves, and it is possible to find data that can serve as a basis for information at the regional level. Such as abundance, degree of association with caves, number of caves in which they occur, and distribution by biome (Guimarães & Ferreira, 2014; Oliveira *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2022; Barros, 2022). However, as in the case of exceptional size colonies, the development of a reference

regional - e.g., abundância, nível de associação com as cavernas, número de cavernas em que ocorrem, distribuição por bioma (Guimarães & Ferreira, 2014; Oliveira *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2022; Barros, 2022). Entretanto, assim como no caso de colônias excepcionais em tamanho, é indicada a elaboração de uma base de dados de referência de espécies raras em cavernas, com dados oriundos de estudos de licenciamento ambiental, a qual poderia ser produzida e atualizada também pela SBEQ – como é feito com a lista de espécies com ocorrência no Brasil (www.sbeq.net/lista-de-especies) – e institucionalizada pelo ICMBio/Cecav, via Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade - SALVE.

3.2 Atributo: Riqueza

Contexto: O número de espécies encontrados em uma caverna é um dado bastante objetivo e prático de ser obtido. Além disso, proteger abrigos e habitats com maiores riquezas é apontado como estratégia prioritária em várias abordagens de conservação (Barros *et al.*, 2021; Margules & Pressey, 2000; Myers, *et al.*, 2000; Pipan *et al.*, 2020).

Definição: Considera o número de espécies presentes na caverna, classificando-a, de acordo com Guimarães e Ferreira (2014), em Baixa Riqueza (de 0 a 3 espécies), Média Riqueza (de 4 a 6 espécies), e Alta Riqueza (7 espécies ou mais).

Sugestão de redação para uma nova IN: Número de espécie de morcegos presentes na caverna, avaliado cumulativamente em todas as amostragens realizadas na caverna, sendo classificadas em baixa (Peso I), média (Peso II), ou alta riqueza (Peso III).

database of rare species in caves with data from environmental licensing studies is suggested. This database could also be created and updated by the SBEQ - as is done with the list of species occurring in Brazil (www.sbeq.net/lista-de-especies) - and institutionalized by ICMBio/Cecav, through the Biodiversity Extinction Risk Assessment System (Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade - SALVE).

3.2 Attribute: Richness

Context: *The number of species found in a cave is objective and practical data to obtain. In addition, protecting roosts and habitats with greater richness is seen as a priority strategy in various conservation approaches (Barros *et al.*, 2021; Margules & Pressey, 2000; Myers, *et al.*, 2000; Pipan *et al.*, 2020).*

Definition: *Considers the number of species present in the cave, classifying it, according to Guimarães and Ferreira (2014), as Low Richness (0 to 3 species), Medium Richness (4 to 6 species), and High Richness (7 species or more).*

Suggested wording for a new IN: *Number of bat species present in the cave, assessed cumulatively in all the carried-out sampling, being classified as low (Weight I), medium (Weight II), or high richness (Weight III).*

Instruções de aplicação: A riqueza de espécies de morcegos deve ser avaliada separadamente à de invertebrados. O número de espécies de morcegos deve ser obtido a partir da utilização de métodos complementares (captura, bioacústica, contagens), e de forma cumulativa considerando as várias amostragens realizadas na caverna (e.g. estações seca e chuvosa). O número de espécies total deve ser classificado em baixa (de 0 a 3 espécies, Peso I), média (de 4 a 6 espécies, Peso II) e alta riqueza (7 espécies ou mais, Peso III). Para cavernas ferríferas, cavernas com seis espécies já devem ser classificadas como possuindo alta riqueza (Barros, 2022).

Instructions for use: Bat species richness should be assessed separately from invertebrate species richness. The number of bat species should be obtained using complementary methods (capture, bioacoustics, counts), and cumulatively considering the various samples taken in the cave (e.g., dry and rainy seasons). The total number of species should be classified as low (0 to 3 species, Weight I), medium (4 to 6 species, Weight II), and high richness (7 species or more, Weight III). For iron caves, caves with six species should already be classified as having high richness (Barros, 2022).

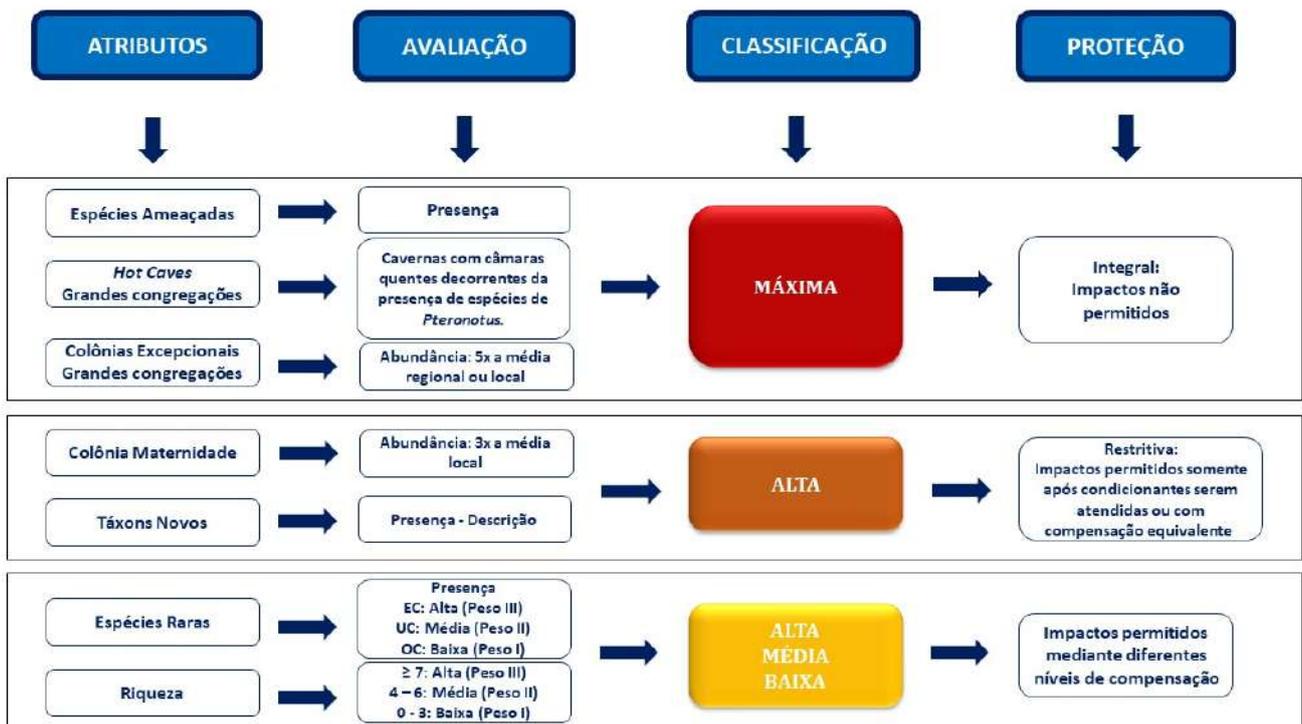


Figura 1 – Quadro esquemático para aplicação dos atributos e critério de avaliação para classificação de relevância de cavernas com foco em morcegos. A ocorrência destes atributos resultará na classificação de relevância em Máxima, Alta, Média ou Baixa, indicando o tipo de proteção sugerida. Os atributos “espécies raras” e “riqueza” serão avaliados com outros atributos bióticos da caverna, que conjuntamente resultarão na classificação final em alta, média ou baixa relevância.

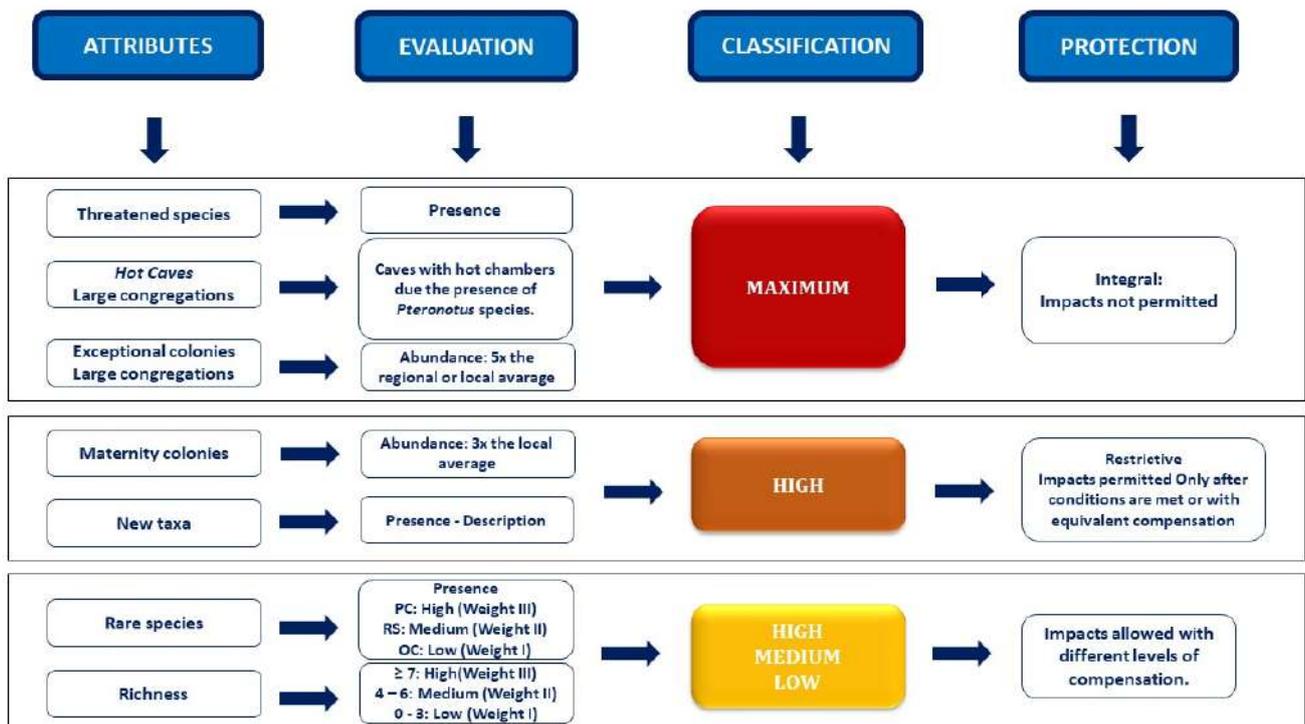


Figure 1 – Schematic framework for applying the attributes and evaluation criteria for classifying the relevance of caves with a focus on bats. The occurrence of these attributes will result in the classification of relevance as Maximum, High, Medium, or Low, indicating the type of protection suggested. The attributes “rare species” and “richness” will be evaluated with other biotic attributes of the cave, which together will result in the final classification of high, medium, or low relevance.

DISCUSSÃO

Neste estudo, considerando experiências internacionais de métodos utilizados para priorização de cavernas para conservação, elaboramos uma proposta de protocolo para classificação de relevância de cavernas no Brasil, com foco em morcegos. Elencamos seis atributos (espécies ameaçadas, hot caves/colônias excepcionais em tamanho, colônias maternidade, táxons novos, espécies raras e riqueza) que podem ser aplicados no processo de licenciamento ambiental brasileiro. Nesta proposta, respeitamos as premissas atuais de avaliação e classificação de relevância de cavernas no Brasil, estabelecidas nas normativas vigentes, mas apontamos sugestões de como este processo pode ser melhorado com a adoção de atributos mais diretos, quantificáveis e menos subjetivos.

DISCUSSION

A protocol proposal for classifying the relevance of caves in Brazil, with a focus on bats was developed in this study, considering international experiences of methods used to prioritize caves for conservation. Six attributes (endangered species, hot caves/exceptional colonies in size, maternity colonies, new taxa, rare species, and richness) that can be applied in the Brazilian environmental licensing process were listed. In this proposal, the current premises for assessing and classifying the relevance of caves in Brazil, established in current regulations were respected. Nevertheless, suggestions were made on how this process could be improved by adopting more direct, quantifiable, and less subjective attributes.

No Brasil, todo o espaço subterrâneo é considerado bem da União e, teoricamente todas as cavernas são a priori protegidas. Assim, os Decretos 6.640/08, e 10.935/22 e a IN/2017 foram estabelecidos para regulamentar as exceções, ou seja, aqueles casos em que as cavernas poderiam então sofrer algum tipo de impacto, o que só pode ocorrer posteriormente à análise de relevância e mediante o licenciamento ambiental. Porém, mesmo com a intenção de minimizar impactos, a atual classificação de relevância das cavernas pode surtir efeitos prejudiciais para a biodiversidade cavernícola (Ferreira et al., 2022). Assim, contribuições que permitam a melhoria das normativas devem ser vistas como positivas, em uma participação salutar da comunidade científica em processos de tomada de decisões que afetem tanto a biodiversidade, quanto o patrimônio espeleológico (Barros et al. 2020a). Ainda assim, mesmo em escala mundial, identificamos que poucos estudos se dispuseram a avaliar e aperfeiçoar as normativas para a proteção de cavernas com ênfase no grupo dos morcegos. Estudos realizados na Turquia, Estados Unidos e Filipinas são propostas pautadas em experimentação científica, criadas especificamente para a classificação de prioridades para conservação dos habitats subterrâneos e dos morcegos. Esses estudos diferem entre si em resposta aos diferentes tipos de ameaças à biodiversidade a que os ambientes subterrâneos estão mais expostos em suas regiões, como a síndrome do nariz branco nos EUA (Neubaum et al., 2017), atividades antrópicas de exploração e caça nas Filipinas (Phelps et al., 2016; Tanalgo et al., 2018), ou o crescimento urbano e suas consequências na Turquia (Furman & Ozgul, 2002). Já no Brasil, a Instrução Normativa 02/17 é uma norma legislativa criada especificamente para a análise de relevância das

In Brazil, all underground space is considered a federal asset and, theoretically, all caves are protected a priori. Therefore, Decrees 6.640/08, 10.935/22, and IN/2017 were established to regulate the exceptions, i.e. those cases in which caves could suffer some kind of impact, which should only occur after the relevance analysis and through environmental licensing. However, even to minimize impacts, the current relevance classification of caves can have detrimental effects on cave biodiversity (Ferreira et al., 2022). Thus, contributions that allow for the regulation's improvement should be seen as positive, in a healthy participation of the scientific community in decision-making processes that affect both biodiversity and speleological heritage (Barros et al. 2020a). Even so, on a global scale, few studies have set out to evaluate and improve regulations for the protection of caves, with an emphasis on the bat group. Studies carried out in Turkey, the United States and the Philippines are proposals based on scientific experimentation, created specifically to classify priorities for the conservation of underground habitats and bats. These studies differ from each other in response to the different types of threats to biodiversity to which subterranean environments are most exposed in their regions. Such as white-noise syndrome in the USA (Neubaum et al., 2017), anthropogenic exploitation and hunting activities in the Philippines (Phelps et al., 2016; Tanalgo et al., 2018), or urban growth and its consequences in Turkey (Furman & Ozgul, 2002). In Brazil, the IN 02/17 is a legislative norm created specifically for the analysis of the relevance of caves for environmental licensing purposes. However, the work of Neubaum et al. (2017) has similar objectives to the intentions of the present study, to consolidate a methodology for classifying caves in order to fill gaps in the USA regulations. In this way, it is possible to identify that there is room for contribu-

cavernas com fins de licenciamento ambiental. No entanto, o trabalho de Neubaum *et al.* (2017) possui objetivos semelhantes às intenções do presente estudo, de consolidar uma metodologia para classificação de cavernas para sanar lacunas das normativas nos EUA. Desta forma, é possível identificar que existe espaço para contribuições – como a aqui apresentada – que visam aperfeiçoar o arcabouço normativo voltado para a conservação dos ambientes cavernícolas não apenas no Brasil, mas em outros países.

De maneira geral, as cinco iniciativas identificadas em nossa pesquisa bibliográfica possuem semelhança em suas avaliações, considerando atributos como riqueza, abundância, endemismo, status de ameaça das espécies, e presença de colônias excepcionais em número de indivíduos, diferindo apenas na maneira como avaliam estes atributos. Atributos como “importância ecológica das espécies” e “interações ecológicas duradouras”, utilizados na IN 02/17 no Brasil, possuem aplicação complexa, uma vez que estes atributos carecem de melhores definições, são subjetivos, e não adotam valores estipulados que permitam mensurar corretamente e de maneira padronizada nem o número, nem a importância destas interações (Barros *et al.*, 2020a). Assim, seguindo atributos já bem estabelecidos em iniciativas internacionais, variáveis como espécies ameaçadas, riqueza, raridade e abundância podem trazer mais objetividade para a avaliação, quando aplicadas de maneira padronizada.

No Brasil, no processo de análise de relevância das cavernas diversos atributos abióticos são analisados: geológicos, hidrológicos, físicos, cênicos, entre outros (Brasil, 2017). Entretanto, ainda que, em teoria, cavernas fora de áreas de licenciamento ambiental possuam status de proteção máximo, diversas outras alterações

tions - such as the one presented here - that aims to improve the regulatory framework for the conservation of cave environments not only in Brazil but also in other countries.

*In general, the five initiatives identified in the literature review are similar in their assessments, considering attributes such as richness, abundance, endemism, species' threat status, and the presence of exceptional colonies regarding the number of individuals, differing only in the way they assess these attributes. Attributes such as “ecological importance of species” and “long-lasting ecological interactions”, used in the IN 02/17 in Brazil, have a complex application, since these attributes lack better definitions, are subjective, and do not adopt stipulated values that allow the number or importance of these interactions to be measured correctly and in a standardized way (Barros *et al.*, 2020a). Therefore, following attributes that are already well established in international initiatives, variables such as endangered species, richness, rarity, and abundance can bring more objectivity to the assessment, when applied in a standardized way.*

*In the cave relevance analyzing process in Brazil, various abiotic attributes are considered, such as geological, hydrological, physical, and scenic, among others (Brasil, 2017). However, even though theoretically, caves outside environmental licensing areas have maximum protection status, various other anthropogenic alterations can affect caves and their associated fauna, since their monitoring is not always guaranteed. Therefore, identifying vulnerabilities and monitoring caves needing conservation strategies should be a constant exercise for the scientific community and environmental government agencies (Medellín *et al.*, 2017).*

All the studies evaluated here used similar classic methodologies in terms of data capture and collec-

antrópicas podem afetar as cavernas e sua fauna associada, uma vez que sua fiscalização nem sempre é garantida. Assim, identificar vulnerabilidades e monitorar cavernas que necessitem de estratégias de conservação deve ser um exercício constante da comunidade científica e dos órgãos ambientais (Medellín *et al.*, 2017).

Todos os estudos aqui avaliados utilizaram metodologias clássicas semelhantes em relação à captura e coleta de dados, e em geral reconhecem a importância de amostragens sazonais. No entanto, com o advento recente de novas tecnologias e a evolução dos estudos em áreas como a bioacústica (Silva & Bernard, 2017) e contagens automatizadas (Corcoran *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2016), a utilização de metodologias complementares é altamente indicada. De forma geral, os estudos identificados nos Estados Unidos, Filipinas e Turquia não apresentaram um consenso ou uma metodologia padrão para valorar os atributos avaliados. Apesar disso, alguns índices mencionados se mostraram válidos para serem aplicados na análise de relevância das cavernas no Brasil (Barros, 2022). Outra questão fundamental a ser considerada em estudos para a conservação de cavernas é a proteção de sua área de entorno, bem como a determinação de áreas de influência. No Brasil, utiliza-se arbitrariamente um raio de 250 metros no entorno das cavernas, valor estabelecido por legislação prévia (Portaria nº 887/90; Resolução CONAMA 347 de 10/04), e que deveria ser usado apenas como medida temporária até que a real área de influência de cada caverna fosse determinada através de estudos específicos. Nas Filipinas, Phelps *et al.* (2016) consideraram uma área de entorno de 1000 metros. No Brasil, algumas espécies de morcegos, incluindo ameaçadas, já responderam positivamente a buffers

tion, and generally recognize the importance of seasonal sampling. However, with the recent advent of new technologies and the evolution of studies in areas such as bioacoustics (Silva & Bernard, 2017) and automated counts (Corcoran et al., 2021; Rodrigues et al., 2016), the use of complementary methodologies is highly indicated. The studies identified in the United States, the Philippines, and Turkey did not present a consensus or a standard methodology for valuing the attributes evaluated. Despite this, some of the indices mentioned proved to be valid for application in the analysis of the relevance of caves in Brazil (Barros, 2022). Another fundamental issue to be considered in cave conservation studies is the protection of their surroundings, as well as the determination of their influence areas. In Brazil, a 250 meter radius around caves is arbitrarily used, a value established by previous legislation (Ordinance No. 887/90; CONAMA Resolution 347 of 10/04), and which should only be used as a temporary measure until the real influence area of each cave is determined through specific studies. In the Philippines, Phelps et al. (2016) considered a surrounding area of 1000 meters. In Brazil, some bat species, including endangered ones, have already responded positively to 1km buffers of preserved areas around caves (Barros et al., 2020b), demonstrating that 250 meters are not a satisfactory value. Therefore, studies to delimit the real influence area of a cave should be a mandatory part of delimiting the protection of surrounding areas in the Brazilian environmental licensing process. Adopting a 250-meter buffer around caves should not be seen as sufficient, from the conservation of bats and their foraging sites point of view.

de 1km de áreas preservadas no entorno das cavernas (Barros *et al.*, 2020b), demonstrando que 250 metros, de fato, não é um valor satisfatório. Assim, estudos prévios de delimitação da real área de influência de uma caverna devem realmente ser parte obrigatória para delimitação da proteção das áreas de entorno nos estudos de licenciamento ambiental no Brasil. Sob o ponto de vista de conservação dos morcegos e de seus locais de forrageio, a adoção de um buffer de 250 metros ao redor das cavernas não deve ser vista como suficiente.

A forma de classificação também foi bastante variada entre os estudos, entretanto, como no Brasil, a análise de relevância considera outros atributos da caverna e a avaliação é feita a partir de escalas locais e regionais, a proposta de protocolo para classificação de cavernas, com foco em morcegos, foi pensada para se adequar à metodologia de valoração e classificação praticada no Brasil. Por fim, apenas no Brasil a possibilidade de recategorização é mencionada, sendo esta possível quando novos fatos, comprovados e decorrentes de estudos técnicos-científicos, forem apresentados e o órgão ambiental licenciador verificar a necessidade de reclassificação (Brasil, 2022).

The classification form was also quite varied between the studies. However, as in Brazil, the relevance analysis considers other attributes of the cave, and the evaluation is carried out on local and regional scales, the proposed protocol for classifying caves, with a focus on bats, was designed to adapt to the valuation and classification methodology practiced in the country. Finally, only in Brazil, the possibility of reclassification is mentioned, which happens when new facts, proven and resulting from technical-scientific studies are presented and the licensing environmental agency verifies the need for reclassification (Brasil, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos para classificação de relevância de cavernas aqui propostos cobrem de maneira prática e objetiva importantes variáveis a serem consideradas no que diz respeito à presença de morcegos em cavernas. Entretanto, alguns pontos ainda permanecem em discussão no meio científico, incluindo, por exemplo, o tamanho para a determinação de colônias maternidades, ou questões temporais do uso da caverna pelos morcegos. As principais dificuldades encontradas para o estabelecimento de atributos satisfatórios para a conservação das espécies e para sanar as necessidades do licenciamento ambiental são decorrentes da falta de dados disponíveis a respeito das espécies, e mais ainda quando consideramos sua presença em cavernas. O Decreto 6.640 de 2008 permitiu um aumento dos estudos realizados em cavernas, entretanto geralmente os dados resultantes destes estudos são de propriedade dos empreendedores, e frequentemente não estão ao alcance de pesquisadores e consultores, limitando assim as possíveis descobertas, discussões e comparações sobre a biologia e ecologia cavernícola em diversas escalas. Desta maneira, é de extrema importância que os órgãos ambientais atuem em parcerias com entidades científicas e pesquisadores para que os dados resultantes dos estudos de impacto ambiental, análises de relevância, e monitoramentos estejam realmente disponíveis para subsidiar o preenchimento de lacunas no conhecimento, melhorias contínuas nas análises ecológicas e ainda consequentemente nos processos regulatórios.

FINAL CONSIDERATIONS

The attributes for the relevance classification of caves proposed here cover in a practical and objective way important variables to be considered concerning bats' presence in caves. However, some points are still under discussion in the scientific community, including, for example, the size for determining maternity colonies, or temporal issues regarding the use of the cave by bats. The main difficulties encountered in establishing satisfactory attributes for the conservation of species and meeting the needs of environmental licensing stem from the lack of data available on species, and even more so when considering their presence in caves. Decree 6.640 of 2008 allowed for an increase in studies carried out in caves, but generally, the data resulting from these studies is the property of the developers, and is often not available to researchers and consultants, thus limiting possible discoveries, discussions and comparisons on cave biology and ecology at various scales. Therefore, it is extremely important for environmental agencies to work in partnership with scientific entities and researchers so that the data resulting from environmental impact studies, relevance analyses, and monitoring is actually available to help fill in the gaps in knowledge, continuously improve ecological analyses and, consequently, regulatory processes.

Outro ponto importante é a necessária padronização das metodologias utilizadas nesses estudos, de forma que os dados resultantes possam ser comparados com estudos de outras regiões. Assim, sugere-se que quando da revisão da Instrução Normativa 02/17 diretrizes com metodologias para coleta de dados padronizadas sejam especificadas. De fato, a IN 02/17 estabelece que “O órgão gestor do CANIE poderá credenciar, mediante os instrumentos legais de cooperação técnica, a alimentação das informações espeleológicas disponíveis no país por outras entidades.” Baseado nisso, sugerimos ainda a realização de uma possível parceria entre o ICMBio/Cecav e os órgãos ambientais fiscalizadores estaduais com a Sociedade Brasileira para o Estudo dos Quirópteros (SBEQ), com o intuito da criação de uma base de dados de morcegos em cavernas no Brasil, considerando os dados acurados e confiáveis obtidos em estudos no âmbito do licenciamento ambiental. As informações dos estudos de relevância e monitoramentos alimentariam então este banco de dados, cuja produção e atualização seriam responsabilidades da SBEQ, mas que poderia ser institucionalizado pelo ICMBio/Cecav via sistema SALVE, e que serviria como referência para os consultores e especialistas atuantes no licenciamento ambiental. A partir deste banco de dados, seria possível ainda a alimentação e futura atualização das listas de referência para os atributos aqui estabelecidos, tais como colônias excepcionais conhecidas por espécie, de espécies raras, ou colônias maternidade.

Com essa proposta, esperamos contribuir para o aperfeiçoamento dos atributos adotados no processo de classificação de relevância de cavidade naturais subterrâneas praticado atualmente no licenciamento ambiental brasileiro.

Another important point is the need to standardize the methodologies used in these studies so that the resulting data can be compared with studies from other regions. It is therefore suggested that when the IN 02/17 is revised, guidelines with standardized data collection methodologies should be specified. In fact, the IN 02/17 states that “CANIE’s management body may accredit, through the legal instruments of technical cooperation, the feeding of speleological information available in the country by other entities.” It is also suggested a possible partnership between ICMBio/Cecav and the state environmental inspection bodies with the SBEQ, to create a database of bats in caves in Brazil, taking into account the accurate and reliable data obtained from studies within the scope of environmental licensing. The information from the relevance and monitoring studies would then feed this database, the production and updating of which would be the responsibility of the SBEQ, but which could be institutionalized by ICMBio/Cecav via the SALVE system, and which would serve as a reference for consultants and specialists working on environmental licensing. From this database, it would also be possible to feed and update reference lists for the attributes established here, such as exceptional colonies known by species, rare species, or maternity colonies.

This proposal will hopefully contribute to improving the attributes adopted in the process of classifying the relevance of underground natural cavities currently practiced in Brazilian environmental licensing. However, it is understood that the protocol proposed here is a first version, and with a greater amount of data available, it should be updated.

Entretanto, entendemos que o protocolo aqui proposto é uma primeira versão, e com uma maior quantidade de dados disponíveis deve passar por atualizações.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida à primeira autora. Agradecemos à Secretaria e Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal da Universidade Federal de Pernambuco (PPGBA/UFPE) por todo o apoio recebido. Agradecemos à Anglo American pelo financiamento da pesquisa, via recursos de compensação ambiental espeleológica destinados ao projeto "Seleção e Uso de Cavernas por Morcegos e suas Implicações para a Classificação de Relevância destes Ambientes", e ao Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste (CEPAN), pelo suporte logístico. Agradecemos especialmente aos especialistas pelo retorno enviado sobre a proposta de protocolo: Augusto Gomes, Carla Nobre, Daniel Reis, Diego Bento, Drielle dos Santos Martins; Eder Barbier, Leonardo Dias, Lucas Rabelo, Marconi Sousa e Silva, Marília Barros, Marina Martins, Nathalia Yurika, Patrício Adriano da Rocha, Rodrigo Lopes Ferreira, e Thiago Castro. Seus comentários e sugestões enriqueceram grandemente a proposta.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for the doctoral scholarship awarded to the first author. We would like to thank the Secretariat and Coordination of the Postgraduate Program in Animal Biology at the Federal University of Pernambuco (PPGBA/UFPE) for all their support. We would like to thank Anglo American for funding the research, through environmental compensation funds for the project "Selection and Use of Caves by Bats and their Implications for the Classification of Relevance of these Environments", and the Northeast Environmental Research Center (CEPAN) for its logistical support. We would especially like to thank the experts for their feedback on the protocol proposal: Augusto Gomes, Carla Nobre, Daniel Reis, Diego Bento, Drielle dos Santos Martins; Eder Barbier, Leonardo Dias, Lucas Rabelo, Marconi Sousa e Silva, Marília Barros, Marina Martins, Nathalia Yurika, Patrício Adriano da Rocha, Rodrigo Lopes Ferreira, and Thiago Castro. Their comments and suggestions greatly enriched the proposal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AULER A. S.; PILÓ, L. B. Introdução à espeleologia. In: *I Curso de espeleologia e licenciamento ambiental*. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, p. 7-23, 2011.

BARROS, J. S. *Seleção e uso de cavernas por morcegos e suas implicações para classificação de relevância destes ambientes*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2022.

BARROS, J. S.; GOMES, A. G.; GUIMARÃES, 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*. 2020a.

BARROS, J. S.; BERNARD, E.; FERREIRA, R. L. Ecological preferences of neotropical cave bats in roost site selection and their implications for conservation. *Basic and Applied Ecology*, v. 45, p. 31–41, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.03.007>

BARROS, J. S.; BERNARD, E.; FERREIRA, R. L. An Exceptionally High Bat Species Richness in a Cave Conservation Hotspot in Central Brazil. *Acta Chiropterologica*, v. 23, n. 1, p. 233-245, 2021.

BARROS, J.S.; BERNARD, E. Species richness, occurrence and rarity of bats in Brazilian caves. *Austral Ecology*, 00, 1–27. 2023a.

BARROS, J. S.; BERNARD, E. Big family, warm home, and lots of friends: *Pteronotus* large colonies affect species richness and occupation inside caves. *Biotropica*, 55(3), 605-616. 2023b.

BERNARD, E.; AGUIAR, L. M. S.; MACHADO, R. B. Discovering the Brazilian bat fauna: a task for two centuries? *Mammal Review*. V. 41, n. 1. p. 23–39, 2011.

BERNARD, E.; AGUIAR, L. M. S.; BRITO, D.; CRUZ-NETO, A. P.; GREGORIN, R.; MACHADO, R. B.; OPREA, M.; PAGLIA, A. P.; TAVARES, V. C. Uma análise de horizontes sobre a conservação de morcegos no Brasil, p. 19-35. In: FREITAS, T. R. O.; VIERA, E. M. (Eds.). *Mamíferos do Brasil: genética, sistemática, ecologia e conservação*. Sociedade Brasileira de Mastozoologia, Rio de Janeiro, 2012.

BERNARD, E; FERREIRA, R. L.; CRUZ, F. W.; PILÓ, L.; CALUX, A. *No ano internacional das cavernas e do carste, as cavernas do Brasil estão em alto risco*. Mongabay: notícias ambientais para informar e transformar. 2021. Disponível em: <https://brasil.mongabay.com/2021/06/no-ano-internacional-das-cavernas-e-do-carste-as-cavernas-do-brasil-estao-em-alto-risco-artigo/>. Acesso: 20 abr 2022.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 009, de 24 de janeiro de 1986. Cria uma Comissão Especial para tratar de assuntos relativos à conservação do patrimônio espeleológico. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 07 abr. 1986. p. 4988.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 347 de 10 de setembro de 2004. Institui o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas-CANIE. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 13 set. 2004. Disponível em: <<http://www.areaseg.com/conama/2004/347-2004.pdf>>. Acesso em: 27 fev 2022.

BRASIL. Decreto Federal nº. 6.640, de 07 de novembro de 2008. Relevância de cavernas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 10 nov. 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm>. Acesso em: 27 fev 2022.

BRASIL. Instrução Normativa MMA nº. 002, de 20 de agosto de 2009. Estabelece uma metodologia específica para a determinação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/in%2002_mma_comentada.pdf>. Acesso em: 25 out 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Instrução Normativa Nº 2 de 30 de agosto de 2017*. Define a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. 2020. Programa Mineração e Desenvolvimento. Portaria MME nº 354 de 28 de setembro de 2020. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Publicado no DOU de 30.09.2020.

BRASIL. Decreto Federal nº. 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Relevância de cavernas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 12 jan 2022.

CORCORAN, M. R; BLACK, E.; HEDRICK, T. L. ThruTracker: Open-Source Software for 2-D and 3-D Animal Video Tracking. *bioRxiv*. 2021. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.05.12.443854>.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. *The biology of caves and other subterranean habitats*. New York, Oxford University Press, 2009.

DELGADO-JARAMILLO, M.; BARBIER, E.; BERNARD, E. New records, potential distribution, and conservation of the Near Threatened cave bat *Natalus macrourus* in Brazil. *Oryx*, v. 52, n. 3, p. 579–586, 2018.

DELGADO-JARAMILLO, M.; AGUIAR, L. M. S.; MACHADO, R. B.; BERNARD, E. Assessing the distribution of a species-rich group in a continental-sized megadiverse country: Bats in Brazil. *Diversity and Distributions*, v. 26, n. 5, p. 632-643. 2020. DOI: 10.1111/ddi.13043

DIAS, A. M.; COOK, C.; MASSARA, R. L.; PAGLIA, A. P. Are Environmental Impact Assessments effectively addressing the biodiversity issues in Brazil? *Environmental Impact Assessment Review*, v. 95, 106801. 2022.

ELLIOTT, W. R. Conservation of the North American cave, and karst biota. *In*: WILKENS, H.; CULVER, D. C.; HUMPHREYS, W. F. (Eds.). *Subterranean Ecosystems*. Ecosystems of the World. Elsevier, Amsterdam, Chap. 34, pp. 665- 689, 2000.

- ELLIOTT, W. R. Protecting caves and cave life. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Eds.). *Encyclopedia of Caves*, Elsevier, Science, 2004. Pp. 458-467.
- FENOLIO, D. B.; GRAENING, G. O.; COLLIER, B. A.; STOUT, J. F. Coprophagy in a cave-adapted salamander; the importance of bat guano examined through nutritional and stable isotope analyses. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 273, p. 439-443, 2006.
- FERREIRA, R. L.; PROUS, X.; MARTINS, R. P. Structure of bat guano communities in a dry Brazilian cave. *Tropical Zoology* v. 20, n. 1, p. 55-74. 2007.
- FERREIRA, R. L.; BERNARD, E.; DA CRUZ JÚNIOR, F. W.; PILÓ, L. B.; CALUX, A.; SOUZA-SILVA, M.; ...; FRICK, W. F. Brazilian cave heritage under siege. *Science*, v. 375, n. 6586, p. 1238-1239, 2022.
- FUREY, N. M.; RACEY, P. A. Conservation ecology of cave bats. In: VOIGT, C. C.; KINGSTON, T. (Eds.) *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Chapter. 15, p. 463-500, 2015.
- FURMAN, A.; ÖZGÜL, A. Distribution of cave-dwelling bats and conservation status of underground habitats in the Istanbul area. *Ecological Research*, v. 17, p. 69-77. 2002.
- GARBINO, G. S. T.; GREGORIN, R.; LIMA, I. P.; LOUREIRO, L.; MORAS, L. M.; MORATELLI, R.; NOGUEIRA, M. R.; PAVAN A. C.; TAVARES, V. C.; PERACCHI, A.L. *Updated checklist of Brazilian bats: versão 2020*. Comitê da Lista de Morcegos do Brasil (CLMB), Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (SBEQ), 2020. Disponível em: <<https://www.sbeq.net/lista-de-especies>>. Acesso em: 20 jan 2022.
- GARBINO, G. S., BRANDÃO, M. V.; TAVARES, V. C. First confirmed records of Godman's Long-tailed Bat, *Choeroniscus godmani* (Thomas, 1903) (Chiroptera, Phyllostomidae), from Brazil and Panama. *Check List*, V. 18, n. 3, p. 493-499, 2022.
- GNASPINI, P. Guano communities. In: WHITE, W. B.; CULVIER, D. C. (Eds.). *Encyclopedia of Caves*, Elsevier, 2012, Pp. 357-364.
- 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, 2015.
- LADLE, R. J.; FIRMINO, J. V. L.; MALHADO, A. C. M.; RODRÍGUEZ-DURÁN, A. Unexplored diversity and conservation potential of Neotropical hot caves. *Conservation Biology*, v. 26, p. 978-982, 2012.
- LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Mobility of bats between caves: ecological aspects and implications for conservation and environmental licensing activities in Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 00, n. 00, p. 1-11, 2021.
- LEWIS, S.E. Roost Fidelity of Bats: A Review. *Journal of Mammalogy*. v. 76, n. 2. 1995.

MAMMOLA, S.; CARDOSO, P.; CULVER, D. C.; DEHARVENG, L.; FERREIRA, R. L.; FIŠER, C.; ... & ZAGMA-JSTER, M. Scientists' warning on the conservation of subterranean ecosystems. *BioScience*, v. 69 n. 8 p. 641-650, 2019.

MARGULES, C., PRESSEY, R. Systematic conservation planning. *Nature* v. 405, p. 243–253, 2000. <https://doi.org/10.1038/35012251>

MEDELLÍN, R. A.; WIEDERHOLT, R.; LOPEZ-HOFFMAN, L. Conservation relevance of bat caves for biodiversity and ecosystem services. *Biological Conservation*, v. 211, p. 45–50, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.01.012>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2022. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Portaria MMA nº 148 de 7 de junho de 2022. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Publicado no DOU de 07.06.2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-406272733>. Acesso em: 20/07/2022.

MITTERMEIER R. A.; GIL, P. R.; BROOKS, T.; HOFFMANN, M.; KONSTANT, W. R.; FONSECA, G. A. B.; MAST, R.B.; *Wildlife spectacles*. CEMEX-Agrupación Sierra Madre-Conservation International. Mexico, 2003.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853–858, 2000. <https://doi.org/10.1038/35002501>

NEUBAUM, D. J.; NAVO, K. W.; SIEMERS, J. L. Guidelines for Defining Biologically Important Bat Roosts: A Case Study from Colorado. *Journal of Fish and Wildlife Management*, v. 8, n. 1, p. 272-282. 2017.

OLIVEIRA, H. F. M.; OPREA, M.; DIAS, R. I. Distributional patterns, and ecological determinants of bat occurrence inside caves: A broad scale meta-analysis. *Diversity*, v. 10, n. 3, 2018.

OTÁLORA-ARDILA, A.; TORRES, J. M.; BARBIER, E.; PIMENTEL, N. T.; LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Thermally assisted monitoring of bat abundance in an exceptional cave in Brazil's Caatinga drylands. *Acta Chiropterologica*, v. 21, n. 2, p. 411-423, 2019.

PEREIRA, M. S. R.; REIS, A. S.; TAVARES, V. C. Morcegos. In: Zampaulo, R. A. & Prous, X. (Org). *Fauna cavernícola do Brasil*. Editora Rupestre. Belo Horizonte. 2022.

PHELPS, K.; JOSE, R.; LABONITE, M.; KINGSTON, T. Correlates of cave-roosting bat diversity as an effective tool to identify priority caves. *Biological Conservation*, v. 201, p. 201–209, 2016.

PIPAN, T.; DEHARVENG, L.; CULVER, D. C. Hotspots of Subterranean Biodiversity. *Diversity*. v. 12, n. 5, p. 209, 2020. <https://doi.org/10.3390/d12050209>.

POLAK, S.; T. PIPAN. Subterranean habitats and fauna, their threats and conservation. Pp. 23–32, In: *Pressures and protection of the underground karst: cases from Slovenia and Croatia* (M. PRELOVŠEK and N. Z. HAJNA, eds.). Postojna, Karst Research Institute ZRC SAZU, 2011. Pp. 192.

ROCHA, P. A. *Quiropterofauna cavernícola: composição, estrutura de comunidade, distribuição geográfica*. Tese. (Doutorado em Ciências Biológicas – Zoologia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

RODRIGUES, E.; TEIXEIRA, J. M.; TEICHRIEB, V.; BERNARD, E. Multi-objective Tracking Applied to Bat Populations. In: *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, Gramado, 2016, p. 155. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7517269>

SILVA C. R.; BERNARD E. Bioacoustics as an important complementary tool in bat inventories in the Caatinga drylands of Brazil. *Acta Chiropterologica* v. 19, n. 2, p. 409–418. 2017.

SIQUEIRA-GAY, J.; SONTER, L. J.; SÁNCHEZ, L. E. Exploring potential impacts of mining on forest loss and fragmentation within a biodiverse region of Brazil's northeastern Amazon. *Resources Policy*, V. 67, 101662, 2020.

TANALGO K. C; TABORA J. A. C; HUGHES A. C. Bat cave vulnerability index (BCVI): A holistic rapid assessment tool to identify priorities for effective cave conservation in the tropics. *Ecological Indicators*, v. 89, p. 852-860, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.064>

TORRES, D. F.; BICHUETTE, M. E. Morcegos cavernícolas depositados na Coleção Científica do Laboratório de Estudos Subterrâneos, UFSCar. *Espeleo-Tema*. v.29, n.1, p. 105-119, 2019.

ZAGMAJSTER, M. Bats. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Eds.). *The Encyclopedia of Caves*. Elsevier Science, Amsterdam, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00013-3>

MATERIAL SUPLEMENTAR

1 - TABELAS COM QUESTÕES NORTEADORES REFERENTES AOS EIXOS LEGISLAÇÃO, ATRIBUTOS BIÓTICOS, ATRIBUTOS ABIÓTICOS, METODOLOGIA APLICADA E CLASSIFICAÇÃO.

Tabela Suplementar 1 – Questões norteadoras para avaliação de métodos utilizados para seleção de cavernas prioritárias, referentes à legislação.

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Envolve alguma legislação específica?	Sim	Sim	Não	Não	Não
Se sim, qual?	Decreto 99.556/1990; Decreto 6.640/2008; Decreto 10.935/22 IN 02/2017	Proibições e restrições no acesso a cavernas (Serviço Florestal 2010; 2013)	NA	NA	NA
É mandatória?	Sim	Sim	Não	Não	Não
IA proposta de classificação é utilizada em processos regulatórios?	Sim	Não	Não	Não	Não
Qual a escala de abrangência?	Nacional	Nacional	Nacional	Regional	Nacional

Tabela Suplementar 2 – Questões norteadoras para avaliação de métodos utilizados para seleção de cavernas prioritárias, referentes à atributos bióticos.

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera Riqueza?	Sim	Não especificado	Sim	Sim	Não
Considera Abundância?	Sim	Sim	Sim	Sim	NA

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera Abundância relativa?	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Se sim, como é mensurada?	Considera para cálculo de diversidade (equitabilidade)	Calculada a partir da parcela da população afetada por determinado impacto (WNS, por exemplo)	Calculada a partir da razão entre a abundância da espécie em determinada caverna (n) e a média de abundância da espécie em todas as cavernas (N) da região: (n/N)	NA	NA
Considera Frequência de Ocorrência?	Não	Não	Sim	Não	Não
Se sim, como é mensurada?	NA	NA	Através de um índice que representa a relação entre as espécies e as cavernas (site=n° cavernas/frequência de ocorrência das espécies)	NA	NA
Considera grandes congregações?	Sim	Sim	Sim	Sim	Não especificado
Considera Diversidade?	Sim	Não especificado	Não especificado	Sim	Não especificado
Considera Endemismo?	Sim	Não especificado	Sim	Não especificado	Não
Se sim, como é mensurado?	Presença de espécies endêmicas	NA	Através de scores definidos para diferentes categorias de endemismo: 2 - não endêmico; 3 - regionalmente endêmico; 4 - Endêmico no país; 5 - restrito a uma ou poucas localidades, ou deficiente em dados.	NA	NA

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera status de conservação das espécies?	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Se sim, como é mensurado?	Presença	Presença	Através de um score para cada status: preocupantes; 3 - espécies pouco preocupantes, mas com populações em decréscimo; 4 - Espécies endêmicas e vulneráveis; 5 - Em perigo; 6 - Criticamente ameaçada, quase extinto; deficiente em dados	Presença	NA
Considera usos específicos para diferentes famílias/espécies?	Não	Sim	Não	Sim	Não

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Se sim, quais?	NA	Hibernáculo: Possui estabilidade microclimática, que impede temperaturas congelantes, mas é frio o suficiente para que os morcegos entrem em torpor nos períodos de recursos limitados; Maternidade: possui temperaturas aconchegantes no começo do verão para criação dos filhotes; Abrigos de transição: usados na primavera e outono na transição entre o hibernáculo e a maternidade; Abrigo para "solteiros": colônias formadas apenas por machos, usados no verão; Abrigos para grandes congregações usados no outono (swarming).	NA	Hibernáculo; Maternidade; Swarming	NA
Considera uso sazonal do abrigo pelas espécies?	Não	Sim	Não	Sim	Não
Considera interações ecológicas?	Sim	Não	Não	Não	Não
Se sim, quais?	Ocorrência de interações ecológicas duradouras raras ou incomuns, incluindo interações tróficas, considerando-se o contexto ecológico-evolutivo.	NA	NA	NA	NA

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera importância ecológica dos morcegos?	Sim	Não	Não	Não	Não
Considera sinais indiretos?	Não especificado	Sim	Não	Não especificado	Não especificado

Tabela Suplementar 3 – Questões norteadoras para avaliação de métodos utilizados para seleção de cavernas prioritárias, referentes à atributos abióticos.

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera Acessibilidade?	Não	Não	Sim	Não	Não
Se sim, como é mensurada?	NA	NA	Através de scores determinados para diferentes níveis: 1 - Fácil acesso, autorização não necessária; 2 - Acesso não permitido, necessário veículo; 3 - Difícil acesso, necessita de permissão para entrada. 4 - Entrada permitida, porém acesso apenas andando por mais de um dia.	NA	NA
Considera tamanho da caverna?	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Considera esforço de exploração?	Sim	Não	Sim	Não	Não

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Se sim, como é mensurado?	NA	NA	1 - Fácil de explorar; 2 - Fácil de explorar, mas com mínimo de obstáculos; 3 - Difícil de explorar, mas não necessita de habilidades especiais; 4 - Muito Difícil, necessita de técnicas para exploração.	NA	NA
Considera tamanho das entradas?	Não	Não	Sim	Não	Não

Tabela Suplementar 4 – Questões norteadoras para avaliação de métodos utilizados para seleção de cavernas prioritárias, referentes à metodologia aplicada.

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Considera amostragens estacionais?	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Se sim, quantas?	Pelo menos em cada estação (seca e chuva)	Em múltiplas estações (primavera, verão, outono e inverno)	NA	Pelo menos uma em cada estação (verão, inverno)	NA
Considera captura e coleta de espécimes?	Sim	Não especificado	Sim	Sim	Sim

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Se sim, por qual metodologia?	Os procedimentos de levantamento faunístico devem seguir métodos consagrados ou de eficácia comprovada cientificamente.	NA	Captura com redes de neblina e contagem direta dos morcegos	Captura com rede de mão ou direto com as mãos	Redes de Neblina
Gera algum índice biótico?	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Qual?	Leva em consideração toda a fauna cavernícola presente: Peso x Contribuição. Ao peso é atribuído um valor de 3 pela presença do atributo e a contribuição é a porcentagem de quanto o atributo representa (pode variar 15%, 20%, 30%).	“Escopo do Abrigo” - Porcentagem da população local das espécies de morcegos afetada por algum impacto: Insignificante (<5%), Baixa (5 a 20%), Moderada (21 a 60%), e Alta (>60%)	BP = Somatória dos escores de cada espécie e a riqueza; (Score da espécie = Ab. * A.rel. * End * Cons. * site)	Em cada caverna, cada espécie tem sua abundância multiplicada por seu score de conservação (4 para espécies ameaçadas - vulneráveis, e 2 para não ameaçadas).	Não

Tabela Suplementar 5 – Questões norteadoras para avaliação de métodos utilizados para seleção de cavernas prioritárias, referentes à classificação e prioridade.

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
A classificação final é numérica?	Não	Não	Sim	Sim	Não
Se sim, qual a escala?	NA	NA	Índice Biótico: Nível 1 (Acima de 100.0000) - alta riqueza, relativamente as maiores populações, com muitas espécies endêmicas e ameaçadas com espécies raras presentes; Nível 2 (60.000 a 100.000) - cavernas prováveis a ter alta riqueza, grandes congregações, pode conter espécies raras e endêmicas ou ameaçadas; Nível 3 (20.000 a 59.000) - caverna provável de ter algumas espécies, poucas populações, maioria das espécies comuns; Nível 4 (Abaixo de 20.000) - Poucas espécies, pequenas populações, espécies comuns e pouco preocupantes. Índice Abiótico: Nível A: (1 a 1.99) - Grande acessibilidade, e com altas perturbações; Nível B (2 a 2.99) - Pouco acessível, mas com alguma perturbação distante; Nível C (3 a 3.99) - Pouco acessível e menos susceptível a perturbação; Nível D (> 4) – Não acessível, sem perturbações.	Pelo menos uma em cada estação (verão, inverno)	NA

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
A classificação final é categórica?	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Se sim, quais as categorias?	Com exceção da Relevância Máxima (definida diretamente pela presença de algumas características especiais), a classificação combina as importâncias: acentuada, significativa e baixa em nível local e regional para definir as relevâncias: Alta, Média e Baixa. Alta relevância: Acent. reg. + Acent. loc. ou Sign. reg. + Acent. Loc; Média Relevância: Sign. Reg. + Sign. Loc. ou baixa reg. + Acent. Loc.; Baixa Relevância: Baixa reg. + Sign. Loc. ou baixa reg. + baixa loc.	Biologicamente importante ou não.	1A, 1B, e 2A - Alta prioridade; 2B até 3D - Prioridade média; 4 A - D - Baixa prioridade	NA	Programa 1: cavernas com altos scores negativos em distúrbios na superfície, Programa 2: cavernas com altos scores para complexidade, e Programa 3: uma combinação entre o 1 e o 2.
A classificação final pode ser alterada posteriormente?	Sim	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Não especificado

QUESTÕES	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brasil	EUA	Filipinas	Turquia	Filipinas
Se sim, mediante quais condições?	Com a reavaliação das características das cavernas e alguma mudança nos atributos presentes.	NA	NA	NA.	NA

SUPPLEMENTARY MATERIAL

1 - TABLES WITH GUIDING QUESTIONS RELATING TO LEGISLATION, BIOTIC ATTRIBUTES, ABIOTIC ATTRIBUTES, APPLIED METHODOLOGY AND CLASSIFICATION.

Supplementary Table 1 – Guiding questions for evaluating the methods used to select priority caves, with reference to legislation.

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Does it involve any specific legislation?	Yes	Yes	No	No	No
If so, which?	Decree 99.556/1990; Decree 6.640/2008; Decree 10.935/22 IN 02/2017	Prohibitions and restrictions on access to caves (Forest Service 2010; 2013)	NA	NA	NA
Is it mandatory?	Yes	Yes	No	No	No
Is the classification proposal used in the legislation processes?	Yes	No	No	No	No
What is the scale of coverage?	National	National	National	Regional	National

Supplementary Table 2 – Guiding questions for evaluating the methods used to select priority caves, regarding biotic attributes.

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Does it considers Richness?	Yes	Not specified	Yes	Yes	No
Does it considers Abundance?	Yes	Yes	Yes	Yes	NA
Does it considers relative abundance?	Yes	Yes	Yes	No	No
If so, how is it measured?	It considers for calculating diversity (equitability)	Calculated from the portion of the population affected by a given impact (WNS, for example)	Calculated from the ratio between the abundance of the species in a given cave (n) and the average abundance of the species in all the caves (N) in the region: (n/N)	NA	NA
Does it considers Frequency of Occurrence?	No	No	Yes	No	No
If so, how is it measured?	NA	NA	Through an index that represents the relationship between the species and the caves (site= n° caves/ frequency of occurrence of the species)	NA	NA
Does it considers large congregations?	Yes	Yes	Yes	Yes	Not specified
Does it considers diversity?	Yes	Not specified	Not specified	Sim	Not specified

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Does it considers endemism?	Yes	Not specified	Yes	Not specified	No
If so, how is it measured?	Presence of endemic species	NA	Through scores defined for different categories of endemism: 2 - not endemic; 3 - regionally endemic; 4 - endemic in the country; 5 - restricted to one or a few localities, or data deficient.	NA	NA
Does it considers the conservation status of species?	Yes	Yes	Yes	Yes	No
If so, how is it measured?	Presence	Presence	Using a score for each status: species of concern; 3 -least concerned species, but with declining populations; 4 - endemic and vulnerable species; 5 - endangered; 6 - critically endangered, near extinction; efficient in data.	Presence	NA
Does it consider uses for different families/species?	No	Yes	No	Yes	No

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
If so, which?	NA	Hibernaculum: has microclimatic stability, which prevents freezing temperatures, but is cold enough for bats to go into torpor during periods of limited resources; maternity colonies: have cozy temperatures in early summer for raising young; transition shelters: used in spring and autumn for the transition between the hibernaculum and the maternity colonies; "bachelor" shelters: colonies formed only by males, used in summer; shelters for large congregations used in autumn (swarming).	NA	Hibernaculum, Maternity and Swarming	NA
Does it consider seasonal use of the shelter by the species?	No	Yes	No	Yes	No
Does it consider ecological interactions?	Yes	No	No	No	No
Does it considers the ecological importance of bats?	Yes	No	No	No	No
Does it consider indirect signs?	Not specified	Yes	No	Not specified	Not specified

Supplementary Table 3 – Guiding questions for evaluating the methods used to select priority caves, regarding abiotic attributes.

QUESTIONS	MMA, IN	Neubaum	Tanalgo	Furman;	Phelps
	02/2017	et al., 2017	et al., 2018	Ozgul, 2002	et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Does it consider accessibility?	No	No	Yes	No	No
If so, how is it measured?	NA	NA	Through scores determined for different levels: 1 - Easy access, no authorization required; 2 - Access not permitted, vehicle required; 3 - Difficult access, requires permission to enter. 4 - Entry permitted, but access only by more than one day of walking.	NA	NA
Does it considers the size of the cave?	Yes	No	Yes	No	Yes
Does it considers exploitation effort?	Yes	No	Yes	No	No
If so, how is it measured?	NA	NA	1- Easy to explore; 2 - Easy to explore, but with minimal obstacles; 3 - Difficult to explore, but does not require special skills; 4 - Very difficult, requires exploration techniques.	NA	NA
Does it consider the size of the entrances?	No	No	Yes	No	No

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
If so, how is it measured?	NA	NA	1 - Two or more people can enter at the same time; 2 - Only one person can enter at a time; 3 - Difficult to enter; 4 - Very difficult, tight entrances and cramped cave	NA	NA
Does it considers the number of entrances?	No	No	No	No	Yes
Does it considers complexity?	No	No	No	No	Yes
If so, how is it measured?	NA	NA	NA	NA	Divide the total length of the cave by the longest length between two stations.
Does it considers water presence?	Yes	No	No	No	Yes
Does it considers water presence?	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Does it consider different impacts of the cave?	Installation and Operation for projects (mining, highways)	Impacts that could affect the local bat population (tourism and the spread of the WNS fungus)	Tourism, Mining, Hunting, Noise in the countryside, Presence of religious structures	NA	Bat hunting, mining, vandalism, tourism.
Which ones?	Installation and Operation for projects (mining, highways)	Impacts that could affect the local bat population (tourism and the spread of the WNS fungus)	Tourism, Mining, Hunting, Noise in the countryside, Presence of religious structures	NA	Bat hunting, mining, vandalism, tourism.

Supplementary Table 4 – Guiding questions for evaluating the methods used to select priority caves, referring to the applied methodology.

QUESTIONS	MMA, IN	Neubaum	Tanalgo	Furman;	Phelps
	02/2017	et al., 2017	et al., 2018	Ozgul, 2002	et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Does it consider seasonal sampling?	Yes	Yes	No	Yes	No
If so, how many?	At least in each season (dry and rainy)	In multiple seasons (spring, summer, fall and winter)	NA	At least one each season (summer, winter)	NA
Does it consider capture and collection of specimens?	Yes	Not specified	Yes	Yes	Yes
If so, by what methodology?	Faunal survey procedures must follow established methods or those that have been scientifically proven to be effective.	NA	Capture with mist nets and direct counting of bats	Catching with a hand net or directly with the hands	Mist nets
Does it generate any biotic index?	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Which ones?	It takes into account all the present cave fauna: Weight x Contribution. The weight is assigned a value of 3 for the presence of the attribute and the contribution is the percentage of how much the attribute represents (can vary 15%, 20%, 30%).	“Shelter Scope” - Percentage of the local bat species population affected by any impact: Insignificant (<5%), Low (5 to 20%), Moderate (21 to 60%), and High (>60%).	BP = Sum of the scores for each species and the richness; (Species score = Ab. * A.rel. * End * Cons. * site)	In each cave, each species has its abundance multiplied by its conservation score (4 for threatened - vulnerable species, and 2 for non-threatened).	No

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
If so, on what scale?	Local: considers a geomorphological unit with spatial continuity; Regional: considers a speleological unit	Considers the local bat population	Local	NA	NA
Does it generate any abiotic index?	Yes	Yes	Yes	No	Yes
If so, which one?	Takes into account various abiotic aspects of the cave (hydrological, geological): Weight X Contribution	Estimated density of shelters available in the area covered by the local population: low, medium and high	BV = Sum of threats assessed/ by the ratio between threats assessed and present ($\sum N/N^{\circ}$)	NA	Disturbance index based on scores: 0= no disturbance, 1= localized and not severe, 2 = high disturbance and well distributed, 3 = severely disturbed
What is the scale?	Local, regional	Local	Local, regional	NA	Cave and landscape
Does it establish an area of influence?	No	No	No	No	Yes
If so, which one?	NA	NA	NA	NA	1km
Does it consider landscape analysis?	No	Yes	Yes	No	Yes

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016	
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines	
If so, how is it measured?	NA	What kind of matrix the cave is in.	Through scores for the impacts around the caves. 1 - All impacts are present near the cave entrance: monoculture farming, mining, deforestation; 2 - Land use is minimal, little has been converted to agriculture; 3 - Land use is present, but very far from the cave entrances; 4 - No land use in the surroundings.	NA	Through the percentage of the surrounding area, it considers the non-forested area, the number of houses and the size of the roads around the caves.	
Does it generate a final index?	Yes	No	Yes	Yes	No	
If so, which one?	It considers the sum of the partial indices of each attribute (Weight x Contribution), to select those that exceed 90 (minimally significant value). In addition, defines the importance: low, significant and accentuated at local and regional level according to the number of significant attributes.		NA	BCVI = (BP) (BV)	The sum of the scores of all the species present in the cave	NA

Supplementary Table 5 – Guiding questions for evaluating the methods used to select priority caves, regarding classification and priority.

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Is the final classification numerical?	No	No	Yes	Yes	No
If so, what is the scale?	NA	NA	<p>Biotic Index: Level 1 (Above 100,000) - high richness, relatively the largest populations, with many endemic and threatened species with rare species present; Level 2 (60,000 to 100,000) - caves likely to have high richness, large congregations, may contain rare and endemic or threatened species; Level 3 (20,000 to 59,000) - cave likely to have a few species, few populations, mostly common species; Level 4 (Below 20,000) - Few species, small populations, common least concerned species. Abiotic Index: Level A: (1 to 1.99) - Very accessible, with high disturbance; Level B (2 to 2.99) - Not very accessible, but with some distant disturbance; Level C (3 to 3.99) - Not very accessible and less susceptible to disturbance; Level D (> 4) - Not accessible, no disturbance.</p>	<p>Level 1 - Most important caves need formal access control (>10,000); Level 2 - Very important caves, access at critical stations should be avoided (> 1000 to 10,000); Level 3 - Low priority caves, used by small populations (> 100 to 1000); Level 4 - Very low priority, used by only a few bats and do not need access control (up to 100).</p>	NA

QUESTIONS	MMA, IN 02/2017	Neubaum et al., 2017	Tanalgo et al., 2018	Furman; Ozgul, 2002	Phelps et al., 2016
	Brazil	EUA	Philippines	Turkey	Philippines
Is the final classification categorical?	Yes	Yes	Yes	No	Yes
If so, which are the categories?	<p>With the exception of Maximum Relevance (defined directly by the presence of some special characteristics), the classification combines the following: accentuated, significant and low importance at local and regional level to define relevance: High, Medium and Low. High Relevance: Accent. reg. + Accent. loc. or Sign. reg. + Accent. loc; Medium Relevance: Sign. Reg. + Sign. Loc. or low reg. + Acent. Loc; Low Relevance: Low reg. + Sign. Loc. or low reg. + low loc.</p>	Biologically significant or not.	1A, 1B, and 2A - High priority; 2B to 3D - Medium priority; 4 A - D - Low priority	NA	<p>Program 1: caves with high negative scores for surface disturbance, Program 2: caves with high scores for complexity, and Program 3: a combination of 1 and 2.</p>
Can the final classification be changed later?	Yes	Not specified	Not specified	Not specified	Not specified
If so, under what conditions?	With the re-evaluation of the cave characteristics and some changes in the present attributes.	NA	NA	NA	NA

CONEXÃO HÍDRICA ENTRE AS CAVERNAS QUARTZÍTICAS BROMÉLIAS e MARTIMIANO II, NA SERRA DE IBITIPOCA, MG

HYDRIC CONNECTION BETWEEN THE BROMELIA AND MARTIMIANO II QUARTZITE CAVES, IN THE IBITIPOCA MOUNTAIN RANGE, MG

Gabriel Lourenço Carvalho de Oliveira

Universidade Federal de Ouro Preto
Sociedade Excursionista e Espeleológica
E-mail: gabriel.carvalho@aluno.ufop.edu.br

Pedro Henrique da Silva Assunção

Universidade Federal de Minas Gerais
Sociedade Excursionista e Espeleológica
E-mail: ph.assuncao.007@gmail.com

Paulo Eduardo Santos Lima

Universidade Federal de Ouro Preto
Sociedade Excursionista e Espeleológica
E-mail: paulo.lima1@aluno.ufop.edu.br

Tiago Vilaça Bastos

Universidade Federal de Ouro Preto
Sociedade Excursionista e Espeleológica
E-mail: foxgeologia@gmail.com

Isaac Daniel Rudnitzki

Universidade Federal de Ouro Preto
Sociedade Excursionista e Espeleológica
E-mail: isaac.rudnitzki@ufop.edu.br

RESUMO

Definir sistemas de cavernas e fluxos hídricos subterrâneos quando a passagem humana é impossibilitada faz-se necessário o uso de técnicas específicas como hidroquímica e a aplicação de corantes traçadores fluorescentes, que são metodologias amplamente usadas em

ABSTRACT

Defining cave systems and underground water flows when human passage is impossible requires the use of specific techniques such as hydrochemistry and fluorescent dye tracers application, which are widely used methodologies in karst environments. The Ibitipoca State Park (Parque Estadual do Ibitipoca

ambientes cársticos. O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIB) está em um distrito espeleológico com elevado número de cavidades em rochas siliciclásticas cadastradas em uma área relativamente pequena (1.488 ha), a maior densidade de cavernas em rochas siliciclásticas de grande porte do Brasil. Sendo assim, este trabalho busca determinar a possível conexão hídrica das drenagens das duas maiores cavernas do PEIB, a Gruta Martimiano II (a maior caverna em quartzito do país) e a Gruta das Bromélias, por meio da análise hidrogeoquímica e da técnica de traçadores fluorescentes, consequentemente definindo o provável maior sistema quartzítico do Brasil, com aproximadamente 7,5 km de condutos subterrâneos.

PALAVRAS-CHAVE: quartzito, cavernas, ibitipoca, traçadores.

INTRODUÇÃO

A presença de cavernas em rochas siliciclásticas são registradas em diferentes locais do mundo, onde redes de cavernas com grandes magnitudes tem sido alvo de estudos sobre espeleogênese, hidroquímica e topografia (Martini 1982, Corrêa-Neto 1997, Aubrecht *et al.* 2011, Fabri 2014, Auler & Sauro 2019). No Brasil, as cavernas em rochas siliciclásticas representam 16% das cavidades conhecidas e cadastradas, ocorrem em áreas cársticas abrangendo cerca de 4,6% do território nacional (Rubiolli *et al.* 2019).

Uma técnica hidrogeológica estabelecida, principalmente em sistemas carbonáticos, é a aplicação de traçadores fluorescentes para a definição de fluxos subterrâneos (Käss 1998, Field 2002, Goldscheider & Drew 2007, Palmer 2007, Ford e Williams 2007, Leibundgut *et al.* 2009, Benischke 2021). Auler (2020) cita limitações

PEIB) is in a speleological district with a high number of registered siliciclastic rock caves in a relatively small area (1,488 ha), the highest density of large siliciclastic rock caves in Brazil. Therefore, this work aims to determine the possible water connection of the two largest caves in the PEIB waterflows, the Martimiano II Cave (the country's largest quartzite cave) and the Bromélias Cave. This was done by hydrogeochemical analysis and the fluorescent tracer technique, consequently defining the probable largest quartzite system in Brazil, with approximately 7.5 km of underground conduits

KEYWORDS: Quartzite, Caves, Ibitipoca, Tracer.

INTRODUCTION

*The presence of caves in siliciclastic rocks is recorded in different places around the world, where cave networks with large magnitudes have been the subject of speleogenesis, hydrochemistry and topography studies (Martini 1982, Corrêa-Neto 1997, Aubrecht *et al.* 2011, Fabri 2014, Auler & Sauro 2019). In Brazil, siliciclastic rock caves represent 16% of the known and registered caves, occurring in karst areas covering around 4.6% of the national territory (Rubiolli *et al.* 2019).*

*The application of fluorescent tracers to define underground flows is an established hydrogeological technique, mainly in carbonate systems (Käss 1998, Field 2002, Goldscheider & Drew 2007, Palmer 2007, Ford and Williams 2007, Leibundgut *et al.* 2009, Benischke 2021). Auler (2020) cites limitations in these studies when the tests are carried out on siliciclastic rocks, mainly due to the degrada-*

nesses estudos quando os testes são feitos em rochas siliciclásticas, principalmente pela degradação da Fluroceína em águas ácidas. Por sua vez, a análise de parâmetros físico-químicos e das características hidroquímicas das águas subterrâneas também podem fornecer importantes informações sobre a dinâmica do fluxo hídrico em um sistema cárstico.

Definida por Correa-Neto (1997), a Província Espeleológica Quartzítica Andrelândia (PEA) apresenta cavernas desenvolvidas sobre rochas quartzíticas na porção basal do Grupo Andrelândia. Nesta província está localizado o Distrito Espeleológico Ibitipoca, foco deste estudo, que possui notável importância no cenário espeleológico mundial, não só pela ocorrência de grande número de cavernas, mas também pelas dimensões notáveis destas.

Inseridas no Distrito Espeleológico de Ibitipoca, e dos limites do Parque Estadual do Ibitipoca (PEIB), destacam-se a Gruta Martimiano II e Gruta das Bromélias, maior caverna em quartzito do Brasil com 4170 metros de projeção horizontal e a quinta maior, com 3447 metros, respectivamente. Essas duas cavidades possuem fluxo hídrico perene com direções parecidas ($Az = 190^\circ$) e estão separadas por 220 metros.

Neste sentido, este trabalho pretende dar enfoque a essas duas grutas, utilizando as técnicas de comparação hidroquímica e testes de traçador para comprovar a conexão hídrica entre elas e o estabelecimento do maior sistema de cavernas quartzíticas do Brasil com aproximadamente 7,5 km de extensão.

tion of fluorescein in acidic waters. In addition, the analysis of physical-chemical parameters and the hydrochemical characteristics of groundwater can also provide important information on the karst system's water flow dynamic.

The Andrelândia Quartzite Speleological Province (Província Espeleológica Quartzítica Andrelândia PEA), as defined by Correa-Neto (1997), features quartzite caves developed in the basal portion of the Andrelândia Group. This province is home to the Ibitipoca Speleological District, which is the focus of this study. It is also of notable importance on the world's speleological scene, not only because of the large number of caves, but also for their remarkable size.

The Martimiano II and Bromélias Caves stand out within Ibitipoca State Park's limits, inserted in the Ibitipoca Speleological District. They are respectively the largest quartzite cave in Brazil with 4170 meters of horizontal projection and the fifth largest, with 3447 meters. These two caves are separated by 220 meters and have perennial water flow in similar directions ($Az = 190^\circ$).

In that context, this work aims to focus on these two caves, using the hydrochemical comparison and tracer tests techniques to prove the water connection between them and the establishment of the largest quartzite cave system in Brazil, approximately 7.5 km long.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região sul do estado de Minas Gerais, Brasil, mesorregião denominada Zona da Mata, no município de Lima Duarte. Encontra-se especificamente dentro dos limites do setor sudoeste do Parque Estadual do Ibitipoca (PEIB), que é uma unidade de proteção integral do estado de Minas Gerais, gerida pelo Instituto Estadual de Floresta (IEF) (Figura 1).

CHARACTERIZATION OF THE STUDY AREA

The study area is located in the southern part of Minas Gerais state, Brazil, in the Lima Duarte municipality mesoregion known as Zona da Mata. It lies specifically within the Ibitipoca State Park's southwestern sector boundaries, which is an integral protection unit of Minas Gerais state, managed by the State Forest Institute (Instituto Estadual de Floresta IEF) (Figure 1).

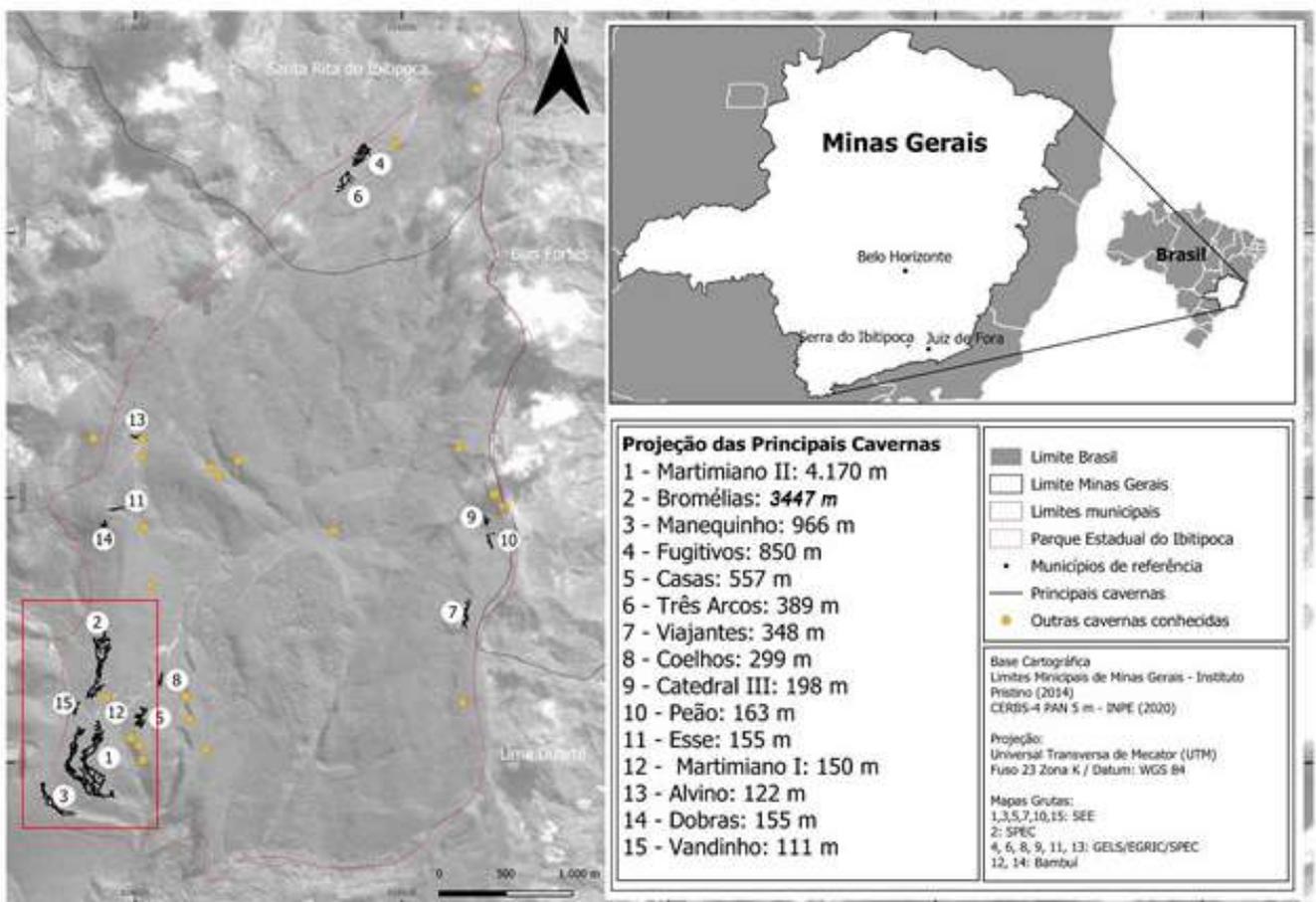


Figura 1 - Mapa de localização da área com destaque para o retângulo vermelho indicando as cavernas da área de estudo.

Figure 1 - Location map of the area with the red rectangle indicating the caves in the study area.

Segundo Rodela & Tarifa (2002), o clima da Serra de Ibitipoca é classificado como tropical de altitude mesotérmico, com verões chuvosos e invernos secos e frios. Essa classificação consi-

According to Rodela & Tarifa (2002), the Ibitipoca mountain range climate is classified as mesothermal high altitude tropical, with rainy summers and dry, cold winters. This classifica-

dera a posição geográfica além das condições térmicas e pluviométricas da Serra de Ibitipoca.

Em relação ao contexto geológico, a área de estudo encontra-se inserida no segmento central da Província Mantiqueira, essa que se desenvolveu durante a Orogênese Brasileira, por processos diacrônicos e estritamente acrescionários, de arcos-de-ilhas e colisão continente-continente (Heilbron *et al.* 2004). O segmento central da Província Mantiqueira engloba o Orógeno Ribeira e sua zona de interferência com o Orógeno Brasília, região esta que foi intensamente afetada por essas deformações orogênicas.

As rochas aflorantes na Serra do Ibitipoca compõem a Sequência Carrancas, formação São Tomé das Letras, unidade basal da Megassequência Andrelândia (Paciullo, 2003). Pelo menos cinco variantes litológicas são apresentadas por Silva (2004) para a Serra do Ibitipoca e seus entornos, aqui destaca-se o quartzito grosso com intercalações de quartzito fino, litologia onde estão inseridas as cavernas do setor sudoeste do PEIB. Destas litologias, o quartzito fino tem maior tendência a espeleogênese, devido a maior quantidade de argilominerais e caulim, se comparado ao quartzito grosso.

Apesar da Serra do Ibitipoca ser toda constituída pelas rochas da Megassequência Andrelândia, as áreas do entorno, com menores altitudes, são compostas por duas unidades do Complexo Mantiqueira. Essas unidades são classificadas por Pinto & Grossi Sad (1991) como um biotita-plagioclásio-gnaiss e por um granada-biotita-gnaiss. Além dessas unidades, ocorrem depósitos coluvionares quaternários, que estão localizados na base da Serra do Ibitipoca (Figura 2). As cavidades estão localizadas apenas nos quartzitos da Fm. São Tomé das Letras, Sequência Carrancas.

tion takes into account Ibitipoca mountain range geographical position as well as the thermal and rainfall conditions.

*Regarding the geological context, the study area is located in the Mantiqueira Province's central segment, which developed during the Brazilian Orogeny, through diachronic and strictly accretionary processes of island arcs and continent-continent collisions (Heilbron *et al.* 2004). The Mantiqueira Province's central segment encompasses the Ribeira Orogen and its interference zone with the Brasília Orogen, a region that was intensely affected by these orogenic deformations.*

The outcropping rocks in the Ibitipoca mountain range make up the Carrancas Sequence, São Tomé das Letras Formation, basal unit of Andrelândia Megasequence (Paciullo, 2003). At least five lithological variants are presented by Silva (2004) for the mountain range and its surrounding. Here the thick quartzite with fine quartzite intercalations, lithology in which the caves in the southwest sector of the PEIB are located, are highlighted. Of these lithologies, fine quartzite is more prone to speleogenesis, due to the greater amount of clay minerals and kaolin compared to thick quartzite.

Although the entire Ibitipoca mountain range is made up of rocks from the Andrelândia Megasequence, the surrounding areas, at lower altitudes, are made up of two units from the Mantiqueira Complex. These units are classified by Pinto & Grossi Sad (1991) as a biotite-plagioclase-gneiss and a garnet-biotite-gneiss. In addition to these units, there are Quaternary colluvial deposits, which are located at the base of Ibitipoca mountain range (Figure 2). Caves are located only in the quartzites of São Tomé das Letras Formation.

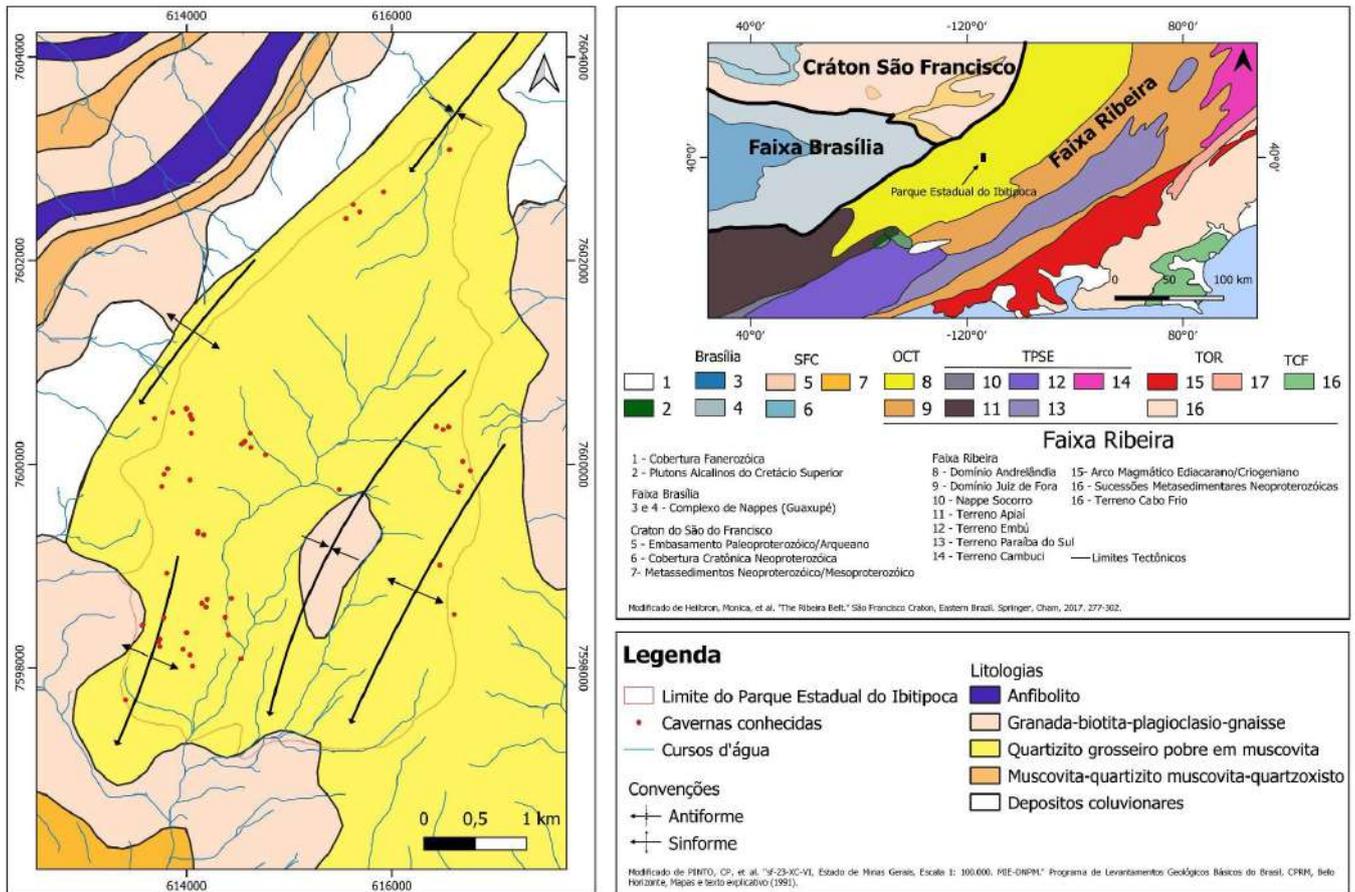


Figura 2 – Mapa geotectônico e geológico da área de estudo, destacando as principais litologias aflorantes nos limites do PEIB.

Figure 2 – Study area's geotectonic and geological map, highlighting the main outcropping lithologies within the PEIB boundaries.

Segundo Rodela (2000a), as drenagens da Serra de Ibitipoca, ocorrem de formas superficiais e são controladas pelas formas de relevo como vales e escarpas, e de formas subterrâneas que são controladas por zonas de fraturas, condutos na forma de rios, percolação e gotejamentos.

According to Rodela (2000a), the Ibitipoca mountain range surface runoff is controlled by relief forms such as valleys and escarpments, and the underground runoff is controlled by fracture zones, underground rivers, percolation and drips.

A drenagem principal da região é o Rio do Peixe, que passa por Lima Duarte e pertence à bacia do Rio Paraíba do Sul. Dois de seus afluentes, os rios do Salto e Vermelho, possuem nascentes dentro da Serra do Ibitipoca. A bacia do Rio Vermelho está restrita à porção norte da serra, enquanto o Rio do Salto percorre todo o vale de nordeste para sudoeste. As cavernas da área de estudo estão inseridas na bacia do Rio do Salto, com as drenagens sendo afluentes do mesmo.

The Rio do Peixe is the main drainage in the region. It passes through Lima Duarte and belongs to the Paraíba do Sul river basin. Two of its tributaries, the Salto and Vermelho rivers, have their sources in the Ibitipoca mountain range. The Vermelho River basin is restricted to the northern portion of the mountain range, while the Salto River runs through the valley from northeast to southwest. The caves in the study area are located in the Salto river basin, with the streams being its tributaries.

Do ponto de vista da espeleologia, vários trabalhos já foram realizados na região da Serra do Ibitipoca. Perez & Grossi (1987), descrevem a existência de pelo menos 13 (treze) grutas dentro dos limites do PEIB; além disso, caracterizam a região como um distrito espeleológico, não somente pela existência dessas cavidades, mas também por apresentar diversas feições cársticas superficiais. Posteriormente estudos de Corrêa-Neto (1993); Corrêa-Neto (1997); Corrêa-Neto *et al.* (1997); Silva (2004); Bento (2015); Teixeira-Silva (2017); Lima *et al.* (2017) e Aguiar (2019) surgem para complementar as informações sobre a espeleologia da serra. De acordo com o banco de dados disponível no Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), existem atualmente 36 cavernas cadastradas dentro dos limites do PEIB.

A Gruta Martimiano II é a maior caverna do PEIB, além de ser a maior em rocha siliciclástica do Brasil, possui 4.140 metros de projeção horizontal e 157 metros de desnível (Rubbioli *et al.* 2019). Aguiar (2019) descreve setores secos com pouca ou ausência de água circulante e erosão ativa, em que feições de escavação canalizadas são observadas, apesar da ausência de drenagens. Além disso, descreve setores com fluxo hídrico perene, que percorre todo o conduto principal da parte leste, surgindo em meio a blocos abatidos intransponíveis até a surgência da gruta na segunda boca.

A Gruta das Bromélias, possui 3.447 metros de galerias topografadas (Oliveira, 2022), essa cavidade, durante muito tempo, permaneceu como sendo a maior do PEIB, até a topografia da Gruta Martimiano II. Apresenta fluxos com poucos centímetros de profundidade que estão presentes por boa parte da

From the speleological point of view, several studies have been carried out in the Ibitipoca mountain range area. Perez & Grossi (1987) describe the existence of at least 13 (thirteen) caves within the PEIB boundaries; in addition, they characterize the region as a speleological district, not only because of the existence of these caves, but also for its several superficial karst features. Subsequently, studies by Corrêa-Neto (1993); Corrêa-Neto (1997); Corrêa-Neto et al. (1997); Silva (2004); Bento (2015); Teixeira-Silva (2017); Lima et al. (2017) and Aguiar (2019) have complemented the information on the mountain range speleology. According to the Brazilian Speleological Society (Sociedade Brasileira de Espeleologia SBE) National Cave Register (Cadastro Nacional de Cavernas CNC) available database, there are currently 36 registered caves within the PEIB boundaries.

The Martimiano II Cave is the largest cave in the PEIB, as well as the largest siliciclastic rock cave in Brazil, with 4,140 meters of horizontal projection and 157 meters of level difference (Rubbioli et al. 2019). Aguiar (2019) describes dry sectors with little or no circulating water and active erosion, in which channelized excavation features are observed, despite the absence of streams. In addition, he describes sectors with perennial water flow, which runs through the eastern part's entire main conduit, emerging in the midst of impassable collapsed blocks until the cave emerges at the second entrance.

The Bromélias Cave has 3,447 meters of mapped galleries (Oliveira, 2022). For a long time, this cave remained as the largest in the PEIB, until the Martimiano II Cave was mapped. It has few centimeters deep streams that are present throughout most of the cave. These water flows are found just before the sinkhole, and at some points in the cave it is possible to see their deviation, caused by the

cavidade. Esses fluxos se encontram logo antes do sumidouro, em alguns pontos da cavidade é possível observar o desvio desses fluxos, causados por acúmulo de sedimentos oriundos do desabamento de algumas galerias (Corrêa-Neto *et al.*, 1993).

Entre elas ocorrem duas pequenas cavidades, as cavernas Vandinho e Jacinto Lage, que estão localizadas entre o sumidouro da Gruta das Bromélias e a surgência da Gruta Martimiano II, a 30 metros da estrada principal do PEIB. No final da Gruta do Vandinho, é observada uma pequena drenagem perene.

MATERIAIS E MÉTODOS

Análises comparativas dos parâmetros físico-químicos e hidroquímicos

Os pontos de coleta para as análises físico-químicas e hidroquímicas de água foram previamente selecionados a partir das informações hidrogeológicas detalhadas obtidas pelos mapas topográficos. A partir dessa pré-seleção, na etapa de campo foram confirmados critérios de localização, contribuição de fontes externas e intermitentes, além da vazão e perenidade da drenagem. Com isso foram selecionados 11 pontos de amostragem (Figura 3), sendo 4 na Gruta Martimiano II, e 7 na Gruta das Bromélias.

*sediment accumulation from the collapse of some galleries (Corrêa-Neto *et al.*, 1993).*

Between them, there are two small caves, the Vandinho and Jacinto Lage caves, which are located between the sinkhole of Bromélias Cave and the Martimiano II cave spring, 30 meters from the main PEIB road. At the end of the Vandinho Cave, there is a small perennial stream.

MATERIALS AND METHODS

Comparative analysis of physicochemical and hydrochemical parameters

The physicochemical and hydrochemical water analysis collection points were previously selected based on the detailed hydrogeological information obtained from the topographic maps. Based on this pre-selection, the field stage confirmed the location criteria, the contribution of external and intermittent sources, as well as the stream flow and perennality. As a result, 11 sampling points were selected (Figure 3), 4 of which were in the Martimiano II Cave and 7 in the Bromélias Cave.

Gruta das Bromélias

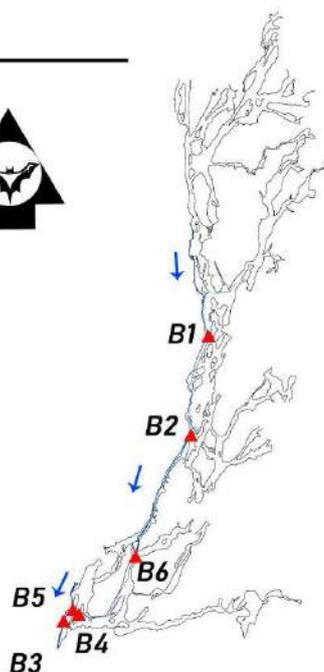
B1



M2



M1



Gruta Martimiano II

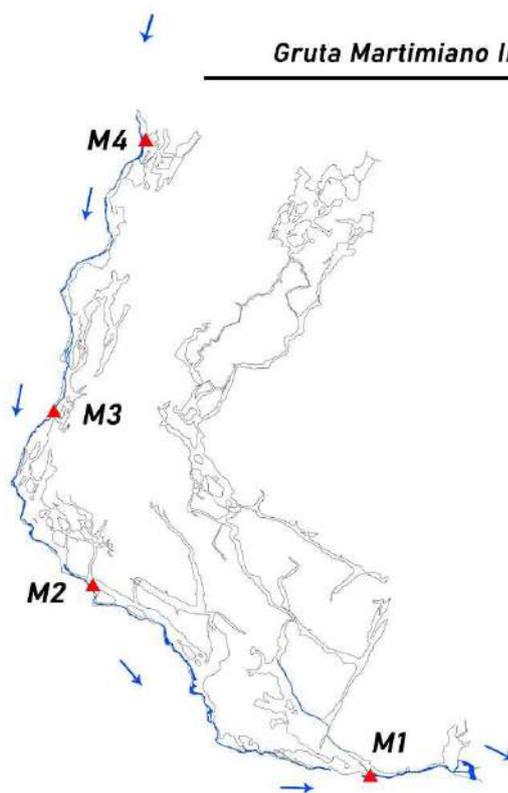


Figura 3 – Pontos de amostragem hidrogeoquímicas nas grutas Bromélias e Martimiano II.

Figure 3 – Hydrogeochemical sampling points in the Bromélias and Martimiano II caves.

Foram realizadas análises dos parâmetros físico-químicos em todos os pontos amostrados tanto no período de seca (setembro de 2021) quanto no período da chuva (março de

Physicochemical parameters were analyzed at all the sampling points during both the dry (September 2021) and rainy season (March 2022). For these analyses, the Myron L Company Ultrameter II™

2022). Para essas análises foi utilizado o multiparâmetro Myron L Company modelo Ultrameter II™, que concede informações rápidas e precisas quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (COND), resistividade (RES), temperatura (T), potencial de oxirredução (ORP) e sólidos totais dissolvidos (TDS).

Para as análises hidroquímicas laboratoriais de elementos maiores e menores foram utilizados os equipamentos do laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, através do ICP-OES "Agilent 725" (espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente).

O procedimento de coleta de água seguiu o padrão apresentado pelo CETESB (1998), para transporte e preservação das amostras. Todas as amostras foram pré-filtradas utilizando seringa e filtro com membrana de 0,45 µm de acetato de celulose e acondicionadas em frascos de polietileno de 30 ml. Para cada ponto foram coletados dois frascos, um deles para a análise dos elementos maiores, menores e traços, que foi acidificado com ácido nítrico ultrapuro (HNO₃ – pH < 2), para estabilização dos metais dissolvidos e um outro frasco que não foi acidificado para a análise da Sílica (SiO₂). Após a amostragem todos os frascos foram armazenados de forma a ficarem refrigerados por temperatura inferior a 4 °C.

Estes dados foram usados para comparar a diferença entre os fluxos hídricos dentro de algumas cavidades do PEIB (grutas Martimiano II, Bromélias, Manequim e Casas), levando em consideração os parâmetros físico-químicos e a ocorrência dos principais elementos dissolvidos nas águas.

multiparameter was used. It provides quick and accurate information on hydrogen potential (pH), electrical conductivity (COND), resistivity (RES), temperature (T), oxidation reduction potential (ORP) and total dissolved solids (TDS).

For the laboratorial hydrochemical analysis of major and minor elements, the equipment of the Federal University of Ouro Preto's Geology Department Geochemistry laboratory was used, using the ICP-OES "Agilent 725" (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry).

The water collection procedure followed the CETESB (1998) standard for the transportation and preservation of samples. All the samples were pre-filtered using a syringe and filter with a 0.45 µm cellulose acetate membrane and packed in 30 ml polyethylene bottles. Two bottles were collected from each point, one for the analysis of major, minor and trace elements, which was acidified with ultrapure nitric acid (HNO₃ – pH < 2), to stabilize the dissolved metals, and another bottle that was not acidified for the analysis of Silica (SiO₂). After sampling, all the vials were stored and refrigerated at a temperature below 4 °C.

This data was used to compare the difference between the water flows within some of the PEIB caves (Martimiano II, Bromélias, Manequim and Casas caves), taking into account the physical-chemical parameters and the occurrence of the main dissolved elements in the water.

Traçadores fluorescentes

Para a injeção e detecção dos traçadores foram definidos 4 pontos, sendo 1 de injeção e 3 de detecção. A injeção foi realizada no sumidouro da Gruta das Bromélias e a detecção nas surgências da Gruta Vandinho e da Gruta Martimiano II (Figura 4).

Fluorescent tracers

Four points were defined for the tracers injection and detection, one for injection and three for detection. Injection was carried out in the Bromélias Cave sinkhole and detection in the the Vandinho and Martimiano II Cave springs (Figure 4).

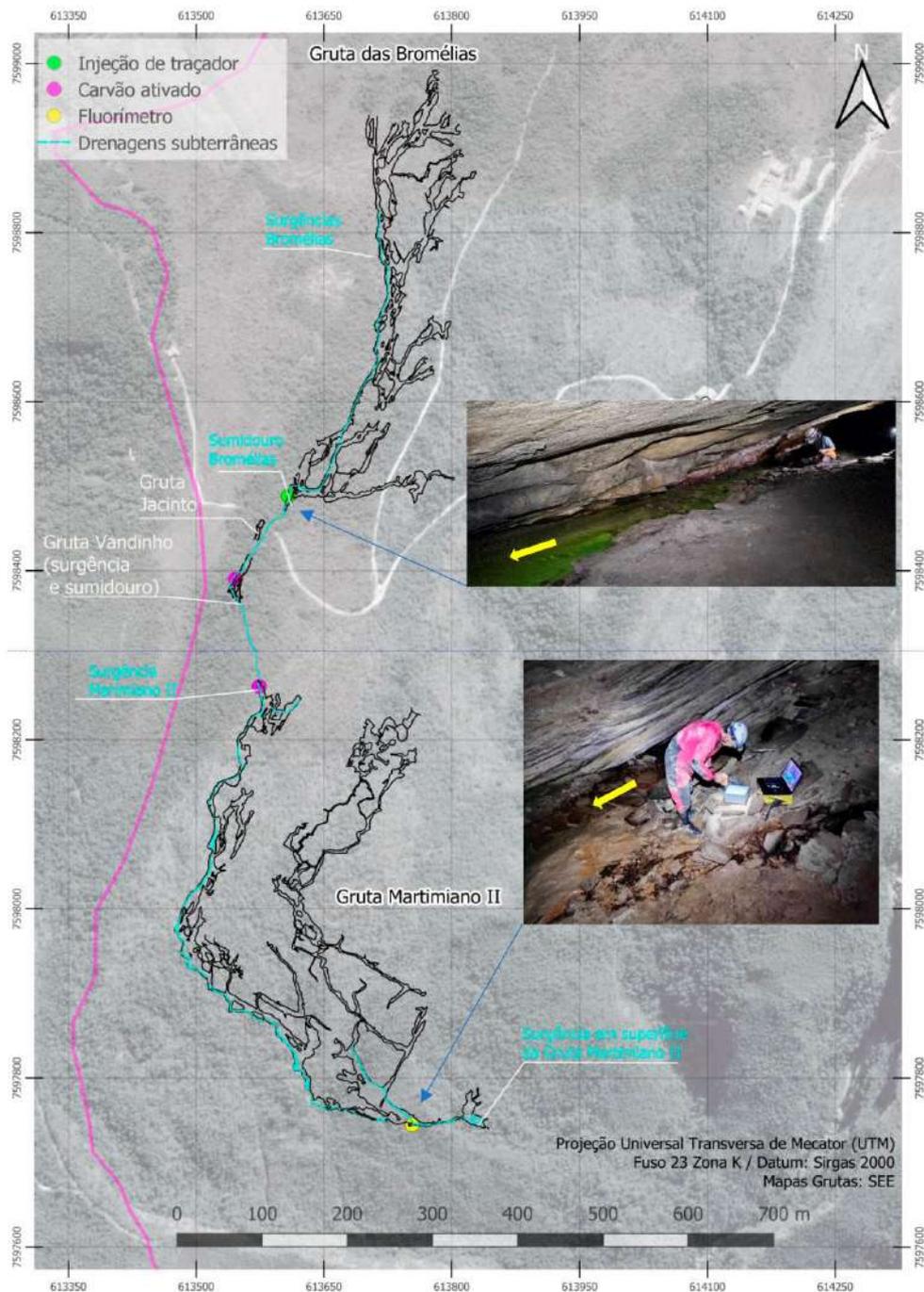


Figura 4 – Mapa das grutas Bromélias, Vandinho e Martimiano II com os respectivos pontos de injeção e detecção.

Figure 4 – Bromélias, Vandinho and Martimiano II caves map, with the respective injection and detection points.

Com os pontos de injeção e detecção selecionados a pesquisa com os traçadores seguiu as seguintes etapas: (i) injeção dos traçadores; (ii) aquisição dos dados ao longo de 17 horas; e (iii) análise dos dados e interpretação dos resultados.

O traçador utilizado para o teste nas Grutas Bromélias e Martimiano II foi a fluoresceína sódica, composto químico amplamente utilizado para tais finalidades e atóxicos nas concentrações adotadas (Aley e Fletcher, 1976).

Nos pontos de detecção, foram realizados dois tipos de amostragem de água: 1) via carvão ativado (detectores estáticos – fluocaptadores), que foram colocados nos pontos estratégicos e instalados de forma a permanecerem junto às zonas de fluxo. Este carvão ativado absorve a fluoresceína e foi submetido à análise no espectrofluorímetro de bancada, nas dependências do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG); 2) via análises in loco, com fluorímetros de campo, para se obter curvas de restituição para análise quantitativa. O fluorímetro usado de modelo GGUN-FL30 (modelos 1650) foi instalado no ponto próximo à segunda entrada da Gruta Martimiano II, por questões logísticas de equipamentos e a dificuldade que a gruta impõe a partir deste trecho (Figura 6) (Schneegg, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comparação hidroquímica

As duas cavernas possuem condutos com drenagens que percorrem os condutos no limite oeste, entre os pontos de coleta B1-M1 (Figura 5), zonas de recarga que se restringem aos

With the injection and detection points selected, the tracer research followed the following steps: (i) tracer injection; (ii) data acquisition over 17 hours; and (iii) data analysis and interpretation of the results.

The tracer used for the Bromélias and Martimiano II Caves test was sodium fluorescein, a chemical compound widely used for such purposes and non-toxic at the adopted concentrations (Aley and Fletcher, 1976).

Two types of water sampling were carried out at the detection points: 1) via activated carbon (static detectors - fluocaptors), which were placed at strategic points and installed so that they remained close to the flow zones. This activated carbon absorbs the fluorescein and it was subjected to analysis in a bench spectrofluorimeter in the Federal University of Minas Gerais (IGC-UFMG) Geosciences Institute premises; 2) via on-site analysis with field fluorimeters to obtain restitution curves for quantitative analysis. The GGUN-FL30 (model 1650) fluorimeter model used was installed near the second entrance point to Martimiano II Cave, for equipment logistical reasons and the difficulty that the cave imposes from this point (Figure 6) (Schneegg, 2002).

RESULTS AND DISCUSSIONS

Hydrochemical comparison

The two caves have conduits with streams that run along the western edge, between collection points B1-M1 (Figure 5), recharge zones that are restricted to the entrances surroundings (entrances and karst

entornos das entradas (bocas e claraboias) e em alguns pontos surgem pequenos fluxos em meio aos sedimentos inconsolidados do chão e em canalículos nas paredes.

A temperatura das águas é menor em B1, próximo das entradas e no começo da drenagem, aumenta 1,5 °C na seca e 1,2 °C na chuva até chegar em M1. Em relação ao pH também observou um leve aumento (+0,3/+0,4), tanto na seca quanto na chuva à jusante do fluxo.

As águas das duas cavidades contêm Ca, Na e Si como elementos maiores de maior concentração, conforme apresentado na Tabela 2. Em relação aos elementos menores, o Al é o que se mostra com as maiores concentrações, embora não apresente uma relação espacial de aumento com o sentido do fluxo.

As concentrações de SiO₂ dissolvida nas amostras variam de 1,89 mg/L a 2,69 mg/L no período de seca e de 1,67 mg/L a 2,21 mg/L no período de chuva. Observa-se um aumento na concentração de SiO₂ ao longo do curso de montante para jusante (B1/M1), e algumas variações entre esses os pontos também são observadas.

Além disso, no sistema Bromélias-Martimiano II a alta velocidade do fluxo (430 m/h), ocasionado pelo alto gradiente hidráulico deste sistema (Correa-Neto, 1997), faz com que a água permaneça pouco tempo em contato com a rocha o que explica as menores concentrações dos íons dissolvidos. O aumento na concentração dos íons ao longo do fluxo pode estar relacionado ao maior tempo de interação da água-rocha, já que é um fluxo subterrâneo extenso, com aproximadamente 1400 m, e com contribuição de outros afluentes ao longo do percurso.

windows). In addition, at some points, small flows appear amidst the unconsolidated sediments on the floor and in the walls channels.

The water temperature is lowest at B1, near the entrances and at the drainage start, increasing by 1.5 °C in the dry season and 1.2 °C in the rainy season until it reaches M1. There was also a slight increase in pH (+0.3/+0.4), both during dry and rainy season downstream of the flow.

The two caves water contain Ca, Na and Si as the most concentrated major elements, as shown in Table 2. Regarding the minor elements, Al is the one with the highest concentrations, although it does not show a spatial relationship of increase with the direction of flow.

The concentrations of dissolved SiO₂ in the samples vary from 1.89 mg/L to 2.69 mg/L during the dry season and from 1.67 mg/L to 2.21 mg/L during the rainy season. There is an increase in SiO₂ concentration along the water course from upstream to downstream (B1/M1), and some variations between these points are also observed.

Furthermore, in the Bromélias-Martimiano II system, the high flow velocity (430 m/h), caused by the high hydraulic gradient of this system (Correa-Neto, 1997), means that the water remains in contact with the rock for a short time, which explains the lower concentrations of dissolved ions. The increase in ion concentration over the course of the flow may be related to the longer interaction time between water and rock, since it is an extensive underground flow, approximately 1400 m long, with contributions from other tributaries along the way.

Estes sistemas estão sob forte influência das águas meteóricas, que recarregam o sistema cárstico pela infiltração na rocha e pelas dolinas e entradas das cavidades, caracterizando uma recarga predominantemente autogênica. Nos períodos chuvosos, com a maior infiltração e o aumento da vazão, ocorre a diluição dos íons nas águas, o que é observado pela menor concentração destes elementos em relação ao período de estiagem (Tabela 1). Portanto, pode-se afirmar que são sistemas abertos com forte interação com os processos atmosféricos. A semelhança das concentrações dos íons e dos parâmetros físico-químicos nas duas cavidades, principalmente entre os pontos B3 (sumidouro da Bromélias) e M4 (surgência da Martimiano II), indica se tratar do mesmo fluxo hídrico, o que valida a existência da conexão hídrica deste sistema.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos e principais cátions encontrados dissolvidos nas amostras dos pontos no sentido do fluxo. Ba, Sr, Zn, Al estão expressos em microgramas por litro e os demais em miligramas por litro.

These systems are strongly influenced by meteoric waters, which recharge the karst system through the rock infiltration and through the dolines and cave entrances, characterizing a predominantly autogenic recharge. In the rainy season, with greater infiltration and increased flow, the ions in the water are diluted, which can be seen in the lower concentration of these elements compared to the dry season (Table 1). Therefore, it can be said that these are open systems with strong interaction with atmospheric processes. The similarity of the ion concentrations and physical-chemical parameters in the two caves, especially between points B3 (Bromélias sinkhole) and M4 (Martimiano II spring), indicates that they are the same water flow, which validates the existence of a water connection in this system.

Table 1 – Physico-chemical parameters and main cations found dissolved in the samples from the points in the flow direction. Ba, Sr, Zn, Al are expressed in micrograms per liter and the others in milligrams per liter.

ID	pH	Temp.	CE	Ba	Sr	Zn	Al	Ca	Na	S	Si	SiO ₂
B1	4.13	16.2	11.8	1.87	0.796	10.6	281	0.352	0.426	0.391	0.881	1.89
	4.94	17.5	9.5	0.62	0.559	-	136.76	0.104	0.129	-	0.78	1.67
B5	4.72	18.4	5.6	1.65	0.522	6.82	95.2	0.318	0.085	-	1.23	2.63
	5.26	18.6	5.1	01.07	0.366	-	101.22	0.103	0.091	-	1.03	2.21
B3	4.36	18.3	14.2	2.36	0.462	10.5	167	0.252	0.134	0.122	1.12	2.40
	05.03	18.01	10.2	01.06	0.439	-	159.35	0.106	0.111	-	0.87	1.86
M4	4.33	18.3	11.2	2.57	0.590	-	156	0.150	0.101	-	1.26	2.69
	05.09	18.05	8.3	0.99	0.512	-	126.99	0.135	0.124	-	0.88	1.89

ID	pH	Temp.	CE	Ba	Sr	Zn	Al	Ca	Na	S	Si	SiO ₂
M1	4.48	17.7	9.6	2.23	0.543	8.98	106	0.248	0.100	-	1.23	2.64
	5.11	18.7	6.9	0.89	0.440	-	103.91	0.089	0.115	-	0.92	1.98
LQ*	-	-	-	0.48	0.294	6.21	10.9	0.0217	0.048	0.115	0.0951	-

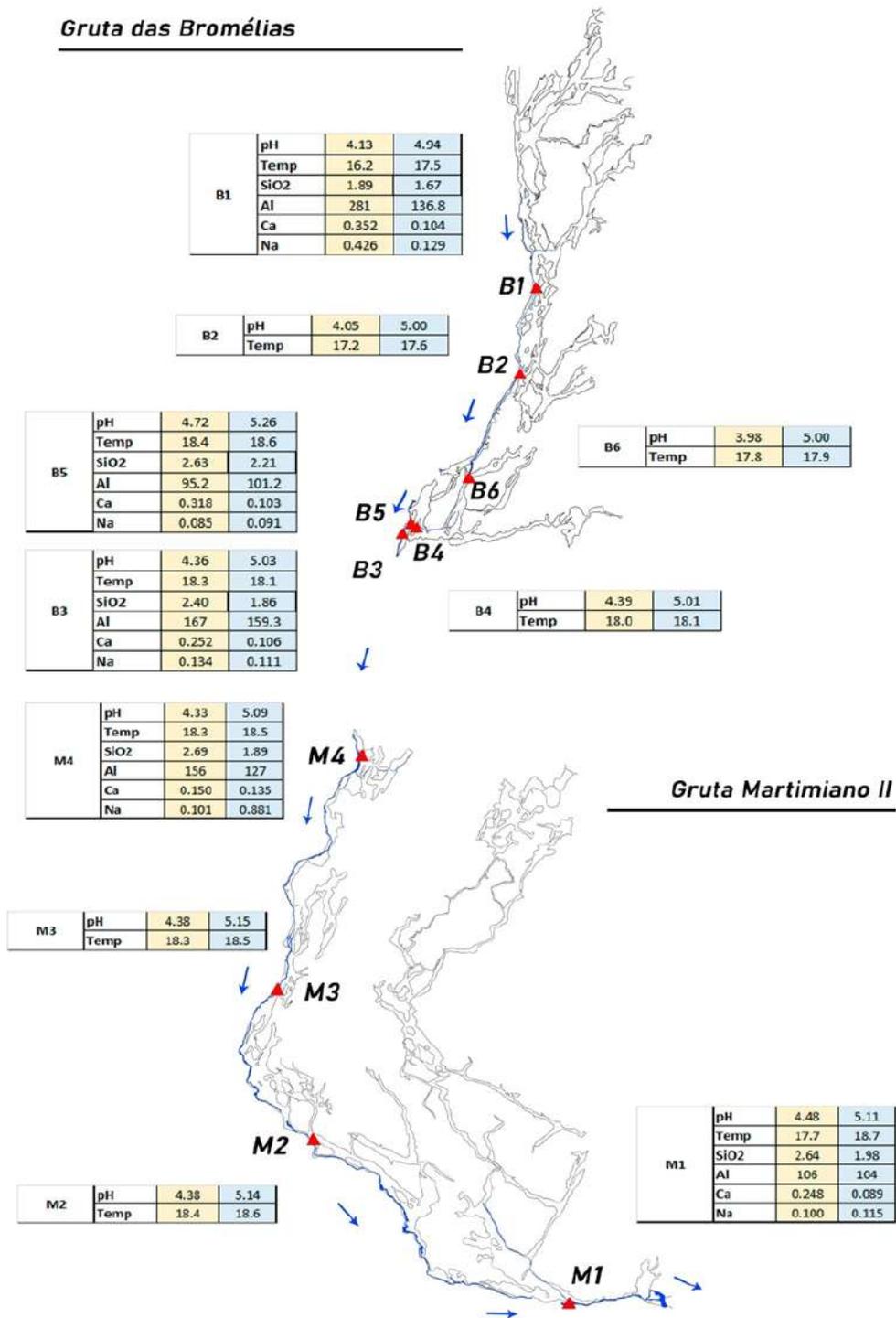


Figura 5 – Distribuição espacial dos pontos e dos dados hidroquímicos ao longo do sistema Bromélias-Martimiano II.

Figure 5 – Spatial distribution of collection points and hydrochemical data along the Bromélias-Martimiano II cave system.

Fluxos subterrâneos e testes de traçadores

A análise qualitativa realizada por meio dos carvões ativado constatou inicialmente a conexão hidráulica entre o sistema Bromélias-Vandinho-Martimiano II. Os valores de concentrações foram 80,7 µg/L para a ressurgência da Vandinho (Fig. 8b) e 40,1 µg/L para ressurgência da Martimiano II (Fig. 8a). Essa constatação valida a hipótese de conexão entre as duas (Bromélias e Martimiano II) cavidades obtidas pelo método de hidroquímica. A análise qualitativa fornece apenas a confirmação da conexão hidráulica, por isso foi realizado uma análise quantitativa para obter as informações a respeito do fluxo deste sistema.

Na análise quantitativa foi possível estimar os parâmetros da curva de restituição e fluxo, sendo eles: a concentração de pico (C_p) = 189,15 µg/L, tempo de chegada (t_1) = 1,5 h, tempo de pico (t_p) = 2 h, massa recuperada (R) = 7%, tempo médio de trânsito (t_m) = 3h e velocidade média do fluxo = 0,12 m/s (Fig. 8 - Gráfico). A partir destes resultados é possível afirmar que o sistema é bem hidrodinâmico e altamente conectado, devido ao alto gradiente que existentes entre as duas cavidades.

Underground flows and tracer tests

The qualitative analysis carried out using activated carbon initially showed a hydraulic connection between the Bromélias-Vandinho-Martimiano II cave system. The concentration values were 80,7 µg/L for the Vandinho spring (Fig. 8b) and 40.1 µg/L for the Martimiano II spring (Fig. 8a). This finding validates the hypothesis of a connection between the two (Bromélias and Martimiano II) caves obtained by the hydrochemical method. The qualitative analysis only provides confirmation of the hydraulic connection, so a quantitative analysis was carried out to obtain information on this system's flow.

In the quantitative analysis, it was possible to estimate the parameters of the restitution and flow curve, which are: peak concentration (P_c) = 189.15 µg/L, arrival time (t_1) = 1.5 h, peak time (p_t) = 2 h, recovered mass (R) = 7%, average transit time (t_m) = 3h and average flow velocity = 0.12 m/s (Fig. 8 - Graph). Based on these results, it can be said that the system is well hydrodynamic and highly connected, due to the high gradient that exists between the two caves.

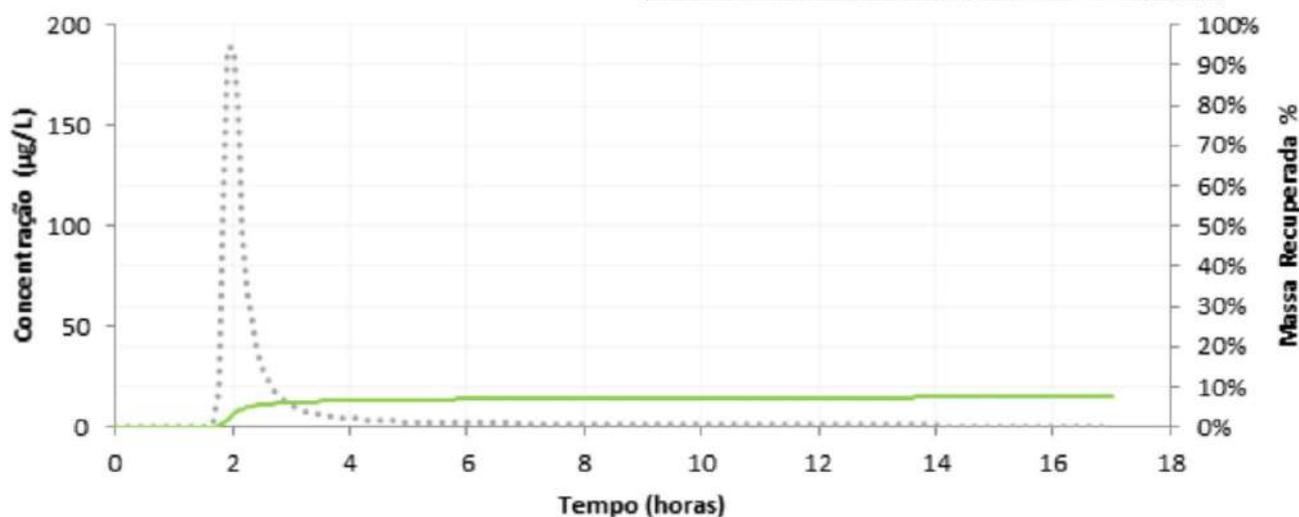
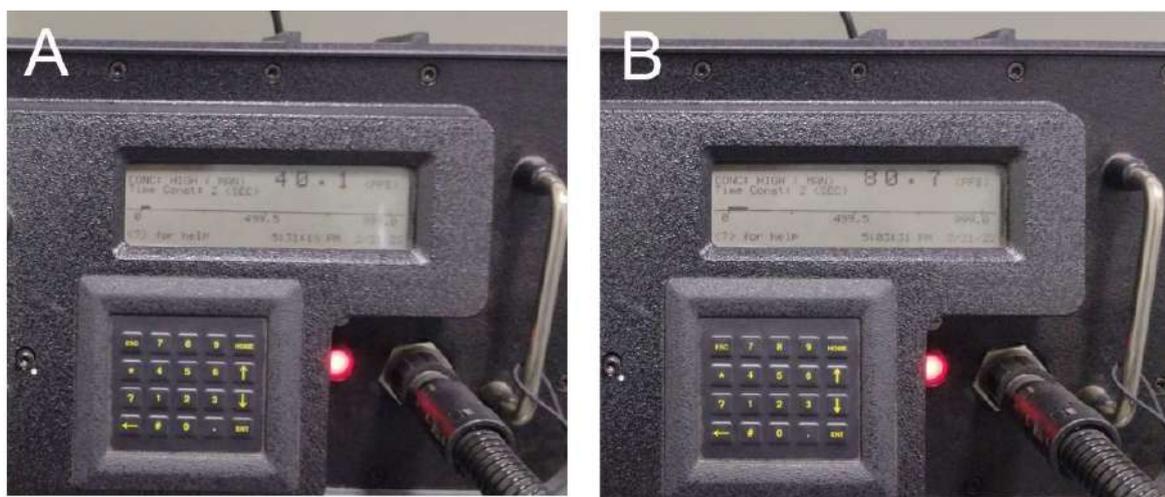


Figura 8 – A) Valor de concentração de fluoresceína no ressurgência da Gruta Vandinho. B) Valor de concentração de fluoresceína na ressurgência da Gruta Martimiano II. Abaixo destaca-se a curva de restituição do traçador e de massa recuperada do traçador pelo fluorímetro.

Figure 8 – A) *Fluorescein concentration value in the Vandinho Cave spring.* B) *Fluorescein concentration value in the Martimiano II Cave spring.* Below is the tracer restitution curve and the mass recovered from the tracer by the fluorimeter.

CONCLUSÕES

Os dados apresentados caracterizam em geral a hidroquímica das grutas Bromélias e Martimiano II na Serra do Ibitipoca. Este levantamento é fundamental para compreender não só a hidrogeoquímica e a conexão das cavidades, mas também para compreender a espeleogênese na Serra do Ibitipoca como um todo.

CONCLUSIONS

The presented data generally characterizes the Bromélias and Martimiano II caves hydrochemistry in the Ibitipoca mountain range. This survey is fundamental for understanding not only the hydrogeochemistry and connection of the caves, but also for understanding speleogenesis in the mountain range as a whole.

As análises dos parâmetros hidroquímicos e físico-químicos mostraram a semelhança entre os pontos B3 e M4, essa semelhança é um forte indício da conexão hídrica das duas cavidades. Os testes realizados com os traçadores, por sua vez, apresentam dados quantitativos e precisos em relação a essa conexão, que, juntamente com os demais dados comprovam a existência do maior sistema de cavernas quartzíticas do Brasil, o sistema Bromélias-Martimiano II, com aproximadamente 7,5 km de condutos subterrâneos.

A comprovação da existência desse grande sistema não apenas contribui para o melhor entendimento acerca das cavernas e da espeleogênese das grutas quartzíticas do PEIB, mas também para o entendimento da área de influência e as ações que devem ser tomadas para a preservação dessas cavidades e consequentemente da manutenção dos sistemas hídricos subterrâneos.

A existência de outras cavidades quartzíticas em toda a Província Espeleológica Andrelândia (PEA) e com feições semelhantes a essas apresentadas, indicam que outros sistemas hídricos possam ocorrer nas demais regiões da província.

Sugere-se que sejam feitas as análises hidroquímicas e com traçadores dos demais sistemas e cavidades do PEIB, levando em consideração a medição das vazões e dos ânions, que foram limitações deste trabalho. Além disso, outros sistemas hídricos dentro dos limites do PEIB, possivelmente tem relação e conectividade, mas que carecem de mais estudos, como o possível sistema Coelhos/Casas/Rasteirinha.

The hydrochemical and physicochemical parameters analysis showed similarities between points B3 and M4, which is a strong indication of the water connection between the two caves. On the other hand the tracers tests carried out provide quantitative and precise data regarding this connection, which, along with the other data, prove the existence of the largest quartzite cave system in Brazil, the Bromélias-Martimiano II cave system, with approximately 7.5 km of underground conduits.

Proving the existence of this large system not only contributes to a better understanding of the PEIB quartzite caves and its speleogenesis, but also to an understanding of the influence area and the actions that should be taken to preserve these caves and consequently the maintenance of underground water systems.

The existence of other quartzite caves throughout the Andrelândia Speleological Province and with similar features to those presented, indicate that other water systems may occur in other regions of the province.

It is suggested that hydrochemical and tracer analyses be carried out on the other systems and caves in the PEIB, taking into account the flows and anions measurements, which were limitations of this work. In addition, other water systems within the PEIB boundaries are possibly related and connected, but need further study, such as the possible Coelhos/Casas/Rasteirinha cave system.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AGUIAR, Bruno Fernandes. Geoespeleologia da Gruta Martimiano II - Parque Estadual do Ibitipoca - Santa Rita de Ibitipoca - MG. 2019.

ALEY, T.; FLETCHER, Mickey W. The water tracer's cookbook. *Missouri Speleology*, 1976, 16.3: 1-32.

AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., GREGOR, M., SCHLÖGL, J., ŠMÍDA, B., BREWER-CARÍAS, C., VLČEK, L., 2011. Sandstone caves on Venezuelan Tepuis: return to pseudokarst? *Geomorphology* 132, 351–365.

AULER, A. S., & SAURO, F. (2019). Quartzite and quartz sandstone caves of South America. in *encyclopedia of caves* (pp. 850-860). Academic press.

AULER, Augusto S.; MEUS, Philippe; PESSOA, Paulo FP. Water Tracing Experiments in Low-pH Quartzite Karst Water, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. In: *Eurokarst 2018, Besançon: Advances in the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs*. Springer International Publishing, 2020. p. 183-191.

BENISCHKE R. 2021. Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 67-88.

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

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 1998. *Sampling and water samples preservation guide*. São Paulo, 150 p.

CORRÊA NETO, A.V., FILHO, J.B., 1997. Espeleogênese em quartzitos da Serra do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. *anu. Inst. Geocienc.* 20, 75–87.

CORRÊA NETO, A.V.; ANÍSIO, L.C.C.; BRANDÃO, C.P. 1993. Um endocarste quartzítico na Serra do Ibitipoca, SE de Minas Gerais. *Anais VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, p. 83-86.

CORRÊA NETO, A.V.; ANÍSIO, L.C.C.; BRANDÃO, C.P.; CINTRA, H.B. 1997. Gruta das Bromélias (mg-042), Serra do Ibitipoca, município de Lima Duarte, MG: Uma das maiores cavernas em quartzito do mundo. *Espeleo-Tema* 18: 1-12.

CORRÊA NETO, A.V.; DUTRA, G. 1997. A Província Espeleológica Quartzítica Andrelândia, sudeste de Minas Gerais. *Anais XXIV Congresso Brasileiro de Espeleologia*, p. 57-64.

FABRI, F. P., AULER, A., & AUGUSTIN, C. H. R. R. (2014). Relevo cárstico em rochas siliciclásticas: uma revisão com base na literatura. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3).

- FIELD M. S. 2002. The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems. National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- FORD D. & WILLIAMS P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. McMaster University, Canada; University of Auckland, New Zealand. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 1, 5p.
- GOLDSCHIEDER N. & DREW D. 2007. Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis. International Contributions to Hydrogeology, 9, 19, 65, 123; 130p.
- HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C., CAMPOS NETO, M.C., SILVA, L.C., TROUW, R.A.J., JANASI, V.C., 2004. A província Mantiqueira. in: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro,
- KASS W. 1998. Tracing technique in geohydrology. Taylor & Francis. Netherlands.
- LEIBUNDGUT A. C., MALOSZEWSKI P., KÜLLS C. 2009. Tracers in hydrology. Wiley-Blackwell.
- LIMA, P. E. S., LOUREIRO, F. T., SILVA, P. H. A., LACERDA, S. G., BERNARDES, V. H. R., VIEIRA, F. F. & CONSTÂNCIO-JUNIOR, C. P. (2017). Caracterização geoespeleológica preliminar da Gruta Martimiano II, Santa Rita de Ibitipoca-MG. in Congresso Brasileiro de Espeleologia (vol. 34, pp. 253-259).
- MARTINI, J.E.J., 1982. Karst in black reef and Wollenberg group quartzite of the eastern Transvaal escarpment. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología 10, 99-114.
- OLIVEIRA, Gabriel Lourenço Carvalho de. Processos hidrogeoquímicos como gatilho para a espeleogênese no setor sudoeste do Parque Estadual do Ibitipoca-MG. 2022.
- PACIULLO, F.V.P., TROUW, R.A.J., RIBEIRO, A., 2003a. Geologia da Folha Andrelândia. in: Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Trouw, R.A.J., Heilbron, M. (eds.), Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro, vol. 1. Projeto Sul de Minas, pp. 84-120.
- PALMER A. N. 2007. Cave Geology. Dayton, OH: Cave Books. 454p.
- PEREZ R.C.; GROSSI, W.R. 1986. The Quartzitic Speleological District of the Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brazil. Anales do IX Congreso Internacional de Espeleologia 2:12-14.
- PINTO, C.P.; GROSSI-SAD, J.H. 1991 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.
- RIBAS, G. P., LIMA, P. E. S., LACERDA, S. G., RIOS, V. H., GUERRA, C., & COSTA, B. D. Geoespeleologia da Gruta Manequinho-Parque Estadual do Ibitipoca-PEI, Santa Rita De Ibitipoca, MG.
- RODELA, L. G., & TARIFA, J. R. (2002). The climate of Serra do Ibitipoca, southeast of Minas Gerais state. GEOUSP Espaço E Tempo (online), 6(1), 101-113.

RODELA, L.G. Distribuição de campos rupestres e cerrados de altitude na Serra do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. São Paulo. Departamento de Geografia - FFLCH - USP / FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. 205p., 2000a.

RUBBIOLI, E., AULER, A., MENIN, D., & BRANDI, R. (2019). Cavernas-atlas do Brasil subterrâneo. Brasília, ICMBio/CECAV. 370p.

SCHNEGG, P. A. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: Articles of the Geomagnetism Group at the University of Neuchâtel, Groundwater and Human Development. Neuchâtel. p. 1484-1488, 2002.

SILVA, S.M. Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais. MG. 2004. 143f. Dissertação de mestrado em geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, BH-MG.

TEIXEIRA-SILVA, C. M., PIRES, L. O., CONSTÂNCIO-JUNIOR, C. P., & VIEIRA, F. F. (2017). Geoespeleologia da Gruta das Casas-Parque Estadual do Ibitipoca-PEI, sudeste de Minas Gerais. in Congresso Brasileiro de Espeleologia (vol. 34, pp. 381-394).

MAPA DO TESOURO: RIQUEZA DE ESPÉCIES DE *Penicillium* NA CAVERNA LAPA DO BOQUEIRÃO DO CERRADO GOIANO

TREASURE MAP: RICHNESS OF *Penicillium* SPECIES IN THE LAPA DO BOQUEIRÃO CAVE IN THE CERRADO OF GOIÁS

Pedro Henrique Félix de Oliveira

Universidade Federal de Goiás
E-mail: felix.pedro@discente.ufg.br

Renato Felipe Ferreira Franco

Universidade Federal de Goiás
E-mail: renato16felipe@gmail.com

Pedro Thiago Santos Nogueira

Universidade Federal de Viçosa
E-mail: pedro.thiago@ufv.br

Renata Santos Momoli

Universidade Federal de Goiás
E-mail: rsmomoli@ufg.br

Cristina Maria de Souza Motta

Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: cristina.motta@ufpe.br

Jadson Diogo Pereira Bezerra

Universidade Federal de Goiás
E-mail: jadsonbezerra@ufg.br

RESUMO

Fungos desempenham um papel ecológico importante nas cavernas, apesar de ainda serem um tesouro que precisa ser explorado no Brasil. Estudos micológicos em cavernas brasileiras têm revelado uma riqueza de fungos surpreendente e ainda desconhecida. O presente estudo

ABSTRACT

*Although they are a treasure that still needs to be explored in Brazil, fungi play an important ecological role in caves. Mycological studies in Brazilian caves have revealed a surprising and still unknown richness of fungi. The aim of this study was to report the richness of *Penicillium* species in*

teve como objetivo relatar a riqueza de espécies de *Penicillium* em caverna do Cerrado, Brasil. Fungos foram isolados do ar e do sedimento de oito pontos da caverna e identificados com base em características morfológicas e de sequências de ITS do rDNA. No total, foram contabilizadas 890 colônias (UFC), sendo 178 (100 = ar e 78 = sedimento) identificadas como *Penicillium*. Associando as duas ferramentas de identificação, isolados representativos foram identificados em 12 espécies pertencentes a cinco seções (*Brevi-compacta*, *Citrina*, *Lanata-Divaricata*, *Exilicaulis* e *Ramosum*), sendo a seção *Citrina* a que apresentou o maior número de espécies (seis), com destaque para *P. sumatraense* com a maior abundância (ar = 25 e sedimento = 15). Para o nosso conhecimento, seis (50%) espécies estão sendo relatadas pela primeira vez em ambiente cavernícola, sendo a maioria (quatro) da seção *Citrina*. O relato da riqueza de espécies de *Penicillium* está entre as “primeiras pistas do mapa do tesouro” escondidas em cavernas brasileiras. O nosso estudo é um exemplo do grande número de espécies de fungos que são encontradas nas cavernas, sugerindo que estudos micológicos do ambiente cavernícola são importantes para inclusão de dados fúngicos no plano de manejo de cavernas com potencial turístico no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: *Eurotiales*, fungos do Brasil, novos relatos, savana brasileira, taxonomia de fungos.

INTRODUÇÃO

As cavernas são consideradas formações geológicas com características bem definidas que carregam consigo aspectos históricos e culturais e, por isso, acabam sendo extremamente atrativas do ponto de vista turístico, principal-

a cave in the Cerrado, Brazil. Fungi were isolated from the air and sediment at eight points in the cave and identified on the basis of morphological characteristics and ITS rDNA sequences. A total of 890 colonies (CFU) were counted, of which 178 (100 = air and 78 = sediment) were identified as Penicillium. Combining the two identification tools, representative isolates were identified in 12 species belonging to five sections (Brevi-compacta, Citrina, Lanata-Divaricata, Exilicaulis and Ramosum), with the section Citrina having the highest number of species (six), with P. sumatraense having the highest abundance (air = 25 and sediment = 15). Six (50%) species are being reported for the first time in a cave environment, the majority (four) from section Citrina. The report of Penicillium species richness is among the “first clues on the treasure map” hidden in Brazilian caves. This study is an example of the large number of fungal species that are found in caves, suggesting that mycological studies of the cave environment are important for including fungal data in the management plan of caves with tourist potential in Brazil.

KEYWORDS: *Eurotiales*, fungi from Brazil, new reports, Brazilian savannah, fungal taxonomy.

INTRODUCTION

Caves are considered to be geological formations with well-defined characteristics that carry with them historical and cultural aspects. For this reason, they end up being extremely attractive from a touristic point of view, especially in Brazil

mente no Brasil (Lobo & Boggiani, 2013; Pedro & Bononi, 2007). Os ambientes cavernícolas apresentam condições propícias para o crescimento e desenvolvimento de microrganismos que estão diretamente ligados à dinâmica desse ecossistema, seja pela deposição de espeleotemas ou pela interação com guano e outros substratos (Barton, 2006). As características únicas do ambiente cavernícola têm aumentado o interesse para o estudo microbiológico, uma vez que a descoberta de mecanismos únicos envolvidos nessa dinâmica pode apresentar possíveis aplicações biotecnológicas e melhor compreensão do papel ecológico (Nieves-Rivera, 2003; Nováková, 2009; Peay *et al.*, 2016; Guerra *et al.*, 2022) e da riqueza fúngica encontrada nesses ecossistemas (Vanderwolf *et al.*, 2013). Apesar da sua importância como *habitat* de diversos seres vivos, dentre eles os fungos, as cavernas encontram-se severamente ameaçadas por atividades como mineração e agricultura, quanto à integridade dos maciços rochosos, contaminação e poluição das águas. Cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas, como calcário, são alvo de mineradoras para produção de cimentos que podem destruir cavidades antes mesmo do conhecimento e identificação de diversas espécies do local.

Os estudos no ambiente cavernícola têm revelado uma riqueza e abundância fúngica de mais de 2.000 espécies com registros em todo mundo (Vanderwolf *et al.*, 2013), inclusive no Brasil onde cerca de 125 espécies de fungos foram relatadas em cavernas do país (Alves *et al.* 2022). Os fungos cavernícolas são considerados cosmopolitas, sendo a maioria oriunda do ambiente externo, e se adaptam à dinâmica ecológica desse ambiente (Zhang *et al.*, 2018). A presença de fungos nas cavernas é diretamente influen-

(Lobo & Boggiani, 2013; Pedro & Bononi, 2007). *Cave environments present favorable conditions for the growth and development of microorganisms that are directly linked to the dynamics of this ecosystem, either through the deposition of speleothems or through interaction with guano and other substrates (Barton, 2006). The unique characteristics of the cave environment have increased interest in microbiological studies, since the discovery of unique mechanisms involved in these dynamics may present possible biotechnological applications and a better understanding of the ecological role (Nieves-Rivera, 2003; Nováková, 2009; Peay et al., 2016; Guerra et al., 2022) and fungal richness found in these ecosystems (Vanderwolf et al., 2013). Despite their importance as a habitat for various living beings, including fungi, caves are severely threatened by activities such as mining and agriculture, in terms of the integrity of the rock masses, contamination and water pollution. Caves developed in carbonate rocks, such as limestone, are targeted by mining companies for the production of cement, which can destroy caves even before the various species at the site are known and identified.*

Studies in the cave environment have revealed a fungal richness and abundance of more than 2,000 species worldwide (Vanderwolf et al., 2013), including in Brazil where around 125 species of fungi have been reported in the country's caves (Alves et al. 2022). Cave fungi are considered cosmopolitan, with the majority coming from the external environment and adapting to the ecological dynamics of this environment (Zhang et al., 2018). Fungi presence in caves is directly influenced by air currents arriving from the external environment (Lobato et al., 2009; Taylor et al., 2014), bats (Cunha et al., 2020; Ferreira et al., 2000a, b; Pereira et al., 2022) or even tourists and researchers (Zhelyazkova et al., 2020). In addition,

ciada pelas correntes de ar que chegam do ambiente externo (Lobato *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2014), morcegos (Cunha *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2000a, b; Pereira *et al.*, 2022) ou até mesmo por turistas e pesquisadores (Zhelyazkova *et al.*, 2020). Além disso, esporos de algumas espécies de fungos que estão suspensos no ar podem causar micoses, tais como a histoplasmose (Ogórek *et al.*, 2014; Vicentini *et al.*, 2012; Zhelyazkova *et al.*, 2020).

Apesar de o Brasil apresentar um grande número de cavernas, totalizando 23.378 registros de acordo com o ICMBio/Cecav (até dezembro de 2022), e o Cerrado possuir aproximadamente 47% das cavernas conhecidas no Brasil (ICMBio/Cecav, 2022a), o país ainda apresenta poucos estudos relacionados à micobiota cavernícola (sendo cerca de 11 cavernas amostradas no Cerrado), o que pode adiar ou, até mesmo, impedir a descoberta e o conhecimento a respeito desse ecossistema e as funções ecológicas dos fungos (Vanderwolf, 2013; Alves *et al.*, 2022). O Cerrado é considerado um dos *hotspots* da biodiversidade no mundo (Klink & Machado, 2005) e, por isso, espera-se que um estudo com base em análises morfológicas e de sequências de DNA possa revelar uma vasta riqueza e abundância de fungos cavernícolas, especialmente de espécies de *Penicillium*. Dados do microbioma das cavernas são essenciais para desenvolvimento de ações de conservação (Lobo & Boggiani, 2013), inclusão de dados microbiológicos nos planos de manejo (Taylor *et al.*, 2013), como exemplo o documento do ICMBio/Cecav (2022b) "Orientações ao uso turístico sustentável da caverna dos Crotes Felipe Guerra-RN", e, conseqüentemente, a descoberta de novidades taxonômicas (Alves *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2022) e possíveis apli-

spores of some fungal species that are suspended in the air can cause mycoses, such as histoplasmosis (Ogórek et al., 2014; Vicentini et al., 2012; Zhelyazkova et al., 2020).

*Brazil has a large number of caves, totaling 23,378 records according to ICMBio/Cecav (until December 2022), with approximately 47% of the known caves in the Cerrado biome (ICMBio/Cecav, 2022a). Nevertheless, the country still has few studies related to cave mycobiota (with around 11 caves sampled in the Cerrado), which may delay or even prevent the discovery and knowledge of this ecosystem and the ecological functions of fungi (Vanderwolf, 2013; Alves et al., 2022). The Cerrado is considered one of the world's biodiversity hotspots (Klink & Machado, 2005) and it is therefore hoped that a study based on morphological and DNA sequence analyses will reveal a vast richness and abundance of cave fungi, especially *Penicillium* species. Data on the caves mycobiome is essential for the development of conservation actions (Lobo & Boggiani, 2013), the inclusion of microbiological data in management plans (Taylor et al., 2013), such as the ICMBio/Cecav (2022b) document "Guidelines for the sustainable tourist use of the Crotes Cave Felipe Guerra-RN" (Orientações ao uso turístico sustentável da caverna dos Crotes Felipe Guerra-RN), and, consequently, the discovery of taxonomic novelties (Alves et al., 2022; Carvalho et al., 2022; Pereira et al., 2022) and possible biotechnological applications of this mycodiversity (de Paula et al., 2019).*

*Much of the cave fungi diversity is associated with the *Penicillium* and *Aspergillus* genera, which are commonly reported in air, soil, sediment and guano samples from caves around the world (Alves et al., 2022; Vanderwolf et al., 2013; Zhang et al., 2017). *Penicillium* species have a worldwide distribution, are important for the natural environment and*

cações biotecnológicas dessa micodiversidade (de Paula *et al.*, 2019).

Grande parte da diversidade de fungos cavernícolas está associada com os gêneros *Penicillium* e *Aspergillus* que comumente são relatados em amostras de ar, solo, sedimento e guano de cavernas em todo o mundo (Alves *et al.*, 2022; Vanderwolf *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017). Espécies de *Penicillium* possuem distribuição mundial, são importantes para o ambiente natural e setores da economia, sendo utilizadas na produção de alimentos (Coton *et al.*, 2020) e moléculas de interesse econômico, tais como antimicrobianos (Belyagoubi *et al.*, 2018) e corantes naturais (Morales-Oyervides *et al.*, 2020). Além disso, algumas espécies são relatadas produzindo micotoxinas em alimentos (Anelli *et al.*, 2019) e causando doenças em humanos (de Oliveira *et al.*, 2023). No Brasil, espécies de *Penicillium* e *Aspergillus* são abundantemente encontradas em diferentes substratos e hospedeiros nas cavernas (Alves *et al.*, 2022).

Baseados na importância ecológica de espécies de *Penicillium* no ambiente cavernícola, o presente estudo concentrou-se em avaliar a riqueza e abundância de espécies de *Penicillium* presentes em caverna do Cerrado. Além disso, o nosso estudo também relata a presença de espécies de *Penicillium* nunca observadas em outras cavernas no mundo, bem como fornece informações para melhor compreensão de parte da dinâmica do ambiente cavernícola, possibilitando a descoberta de novas espécies e o fornecimento de dados micológicos para inclusão em plano de manejo de cavernas com potencial turístico no Cerrado, Brasil.

sectors of the economy, being used in the production of food (Coton et al., 2020) and molecules of economic interest, such as antimicrobials (Belyagoubi et al., 2018) and natural dyes (Morales-Oyervides et al., 2020). In addition, some species are reported to produce mycotoxins in food (Anelli et al., 2019) and cause disease in humans (de Oliveira et al., 2023). In Brazil, species of Penicillium and Aspergillus are abundantly found on different substrates and hosts in caves (Alves et al., 2022).

Based on the Penicillium species ecological importance in the cave environment, this study focused on assessing the richness and abundance of Penicillium species present in Cerrado caves. In addition, the study also reports the presence of Penicillium species never observed in other caves in the world, as well as providing information to better understand part of the cave environment dynamics, enabling the discovery of new species and providing mycological data for inclusion in management plans for caves with tourist potential in the Brazilian Cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

Caverna Lapa do Boqueirão

Para a coleta de fungos do ar e de solo/sedimento, foi realizada uma expedição científica em maio de 2022 na caverna Lapa do Boqueirão (Lat. 15°24'34"S e Long. 48°43'57"W), localizada no município de Vila Propício-GO, Brasil (Figura 1). A região compreende rochas carbonáticas, como calcário da Formação Araxá; solos profundos, como os Latossolos, nas áreas aplainadas e Neossolos Litólicos, nas encostas íngremes e o clima é marcado por duas estações (seca e chuvosa) bem definidas. As principais atividades econômicas da região são agricultura (ex. soja, milho, cana e pastagem) e mineração (ex. cimento), atividades que, eventualmente, podem contribuir para a incidência de impactos ambientais. A caverna estudada é caracterizada pela presença de espeleotemas e serrapilheira (ex. troncos de árvores e folhas); além disso, é habitada por animais (ex. morcegos, aranhas e pequenos anfíbios), está inserida no bioma Cerrado e possui facilidade de deslocamento turístico, mesmo sem a infraestrutura necessária (Freitas *et al.*, 2019). Para estudo micológico da caverna, foram definidos oito pontos de coleta após reconhecimento do ambiente por meio de uma caminhada exploratória, sendo os pontos de coleta 1 e 8 externos (considerando que a caverna possui duas aberturas principais) e os demais pontos definidos dentro da caverna. A coleta de material da caverna foi autorizada pelo ICMBio/Cecav (SISBIO Número: 82254-1).

MATERIALS AND METHODS

Lapa do Boqueirão Cave

*To collect fungi from the air and soil/sediment, a scientific expedition was carried out in May 2022 in the Lapa do Boqueirão cave (Lat. 15°24'34"S and Long. 48°43'57"W), located in the municipality of Vila Propício-GO, Brazil (Figure 1). The region comprises carbonate rocks, such as limestone from the Araxá Formation; deep soils, such as Latosols in the flattened areas and Litholic Neosols on the steep slopes, while the climate is marked by two well-defined seasons (dry and rainy). The main economic activities in the region are agriculture (e.g. soy, corn, sugar cane and pasture) and mining (e.g. cement), activities that can eventually contribute to environmental impacts. The studied cave is characterized by the presence of speleothems and plant litter (e.g. tree trunks and leaves). In addition, it is inhabited by animals (e.g. bats, spiders and small amphibians), is part of the Cerrado biome and is easily accessible to tourists, even without the necessary infrastructure (Freitas *et al.*, 2019). After recognizing the environment through an exploratory walk, eight collection points were defined for the mycological study of the cave, with collection points 1 and 8 being external (considering that the cave has two main openings) and the other points defined inside the cave. The material collection from the cave was authorized by ICMBio/Cecav (SISBIO Number: 82254-1).*

Isolamento de fungos do ar e do sedimento da caverna

Para isolamento de fungos do ar, foi utilizado o método de sedimentação passiva em meio de cultura contido em placas de Petri: Ágar Dicloran Rosa Bengala Cloranfenicol (DRBC) e Ágar Sabouraud Dextrose acrescido de cloranfenicol (100 mg.L⁻¹) (ASC). Três placas de Petri de cada meio de cultura (DRBC e ASC) foram abertas em cada ponto de coleta durante 20 minutos a 1 m acima do piso da caverna (Cunha *et al.*, 2020).

Para o isolamento de fungos de sedimento, foram coletadas amostras (aproximadamente 10g de cada ponto de coleta) em triplicata e acondicionadas em recipiente esterilizado. Em seguida, 1g de sedimento foi suspenso em 9 mL de água destilada e esterilizada e agitado manualmente. Dessa suspensão foram realizadas diluições seriadas até 10⁻⁴. Das diluições 10⁻³ e 10⁻⁴, 1 mL foi transferido para a superfície dos meios DRBC e ASC contidos em placas de Petri (Cunha *et al.*, 2020).

Para ambos os isolamentos, as placas foram incubadas no escuro a 20-22°C por um período de 7-14 dias para contagem de unidade formadora de colônias (UFC) e seleção de isolados representativos (Cunha *et al.*, 2020).

Seleção de isolados de *Penicillium*

Para a seleção dos isolados de *Penicillium* foram analisadas as estruturas macro e micromorfológicas. O processo de identificação genérica e agrupamento dos 39 isolados representativos foi realizado utilizando metodologia e literaturas especializadas (ex. Crous *et al.*, 2009; Samson *et al.*, 2010; Seifert *et al.*, 2011). As estruturas micromorfológicas

Isolation of air and cave sediment fungi

To isolate fungi from the air, the passive sedimentation method was used in culture media contained in Petri dishes: Dichloran Rose Bengal Chloramphenicol Agar (DRBC) and Sabouraud Dextrose Agar with chloramphenicol (100 mg.L⁻¹) (SDAC). Three Petri dishes of each culture medium (DRBC and SDAC) were opened at each collection point for 20 minutes at 1 m above the cave floor (Cunha *et al.*, 2020).

To isolate fungi from the sediment, samples (approximately 10g from each collection point) were taken in triplicate and placed in a sterilized container. Then, 1g of sediment was suspended in 9 mL of sterilized distilled water and manually shaken. Serial dilutions up to 10⁻⁴ were made of this suspension. Of the 10⁻³ and 10⁻⁴ dilutions, 1 mL was transferred to the surface of the DRBC and SDAC media contained in Petri dishes (Cunha *et al.*, 2020).

For both isolates, the plates were incubated in the dark at 20-22°C for a period of 7-14 days to count colony-forming units (CFU) and select representative isolates (Cunha *et al.*, 2020).

Selection of *Penicillium* isolates

To select the *Penicillium* isolates, the macro and micromorphological structures were analyzed. The process of generic identification and grouping of the 39 representative isolates was carried out using specialized methodology and literature (e.g. Crous *et al.*, 2009; Samson *et al.*, 2010; Seifert *et al.*, 2011). The micromorphological structures of the fungi (e.g. conidiophores, hyphae, conidia,

dos fungos (ex. conidióforos, hifas, conídios, esporos etc.) foram analisadas preparando-se lâminas com ácido láctico 85% e/ou corante azul de lactofenol. Isolados representativos do gênero *Penicillium* foram preservados em água com glicerol (10%) para posterior identificação específica.

*spores, etc.) were analyzed by preparing slides with 85% lactic acid and/or lactophenol blue dye. Representative isolates of the *Penicillium* genus were preserved in water with glycerol (10%) for later specific identification.*

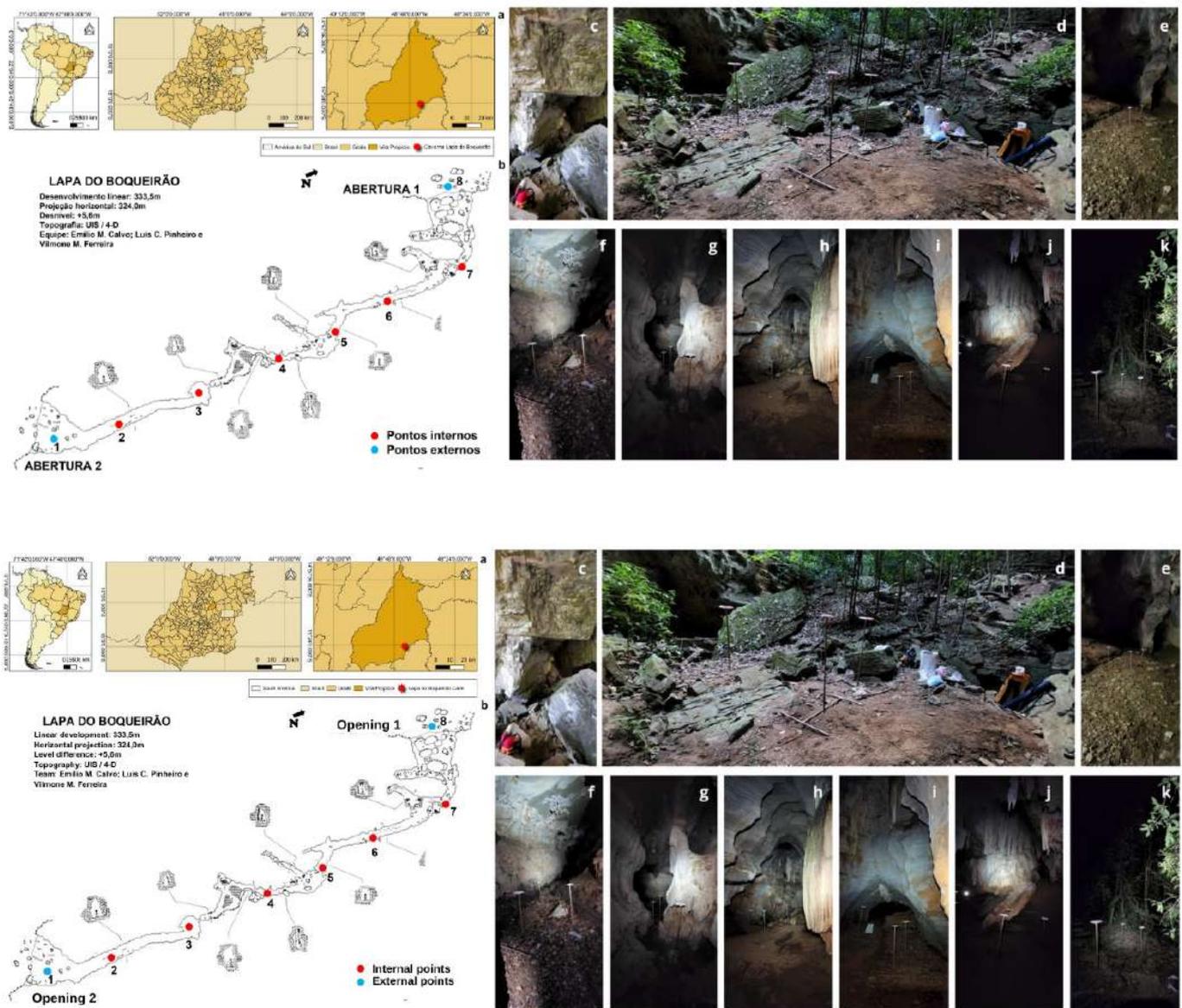


Figura 1 – Caverna Lapa do Boqueirão, Cerrado goiano, Vila Propício, Goiás, Brasil. a. Localização geográfica. b. Croqui da caverna. c-k. Detalhes da caverna e pontos de coleta. Fotos: de Oliveira P. H. F. & Bezerra J. D. P.; Croqui da caverna: Calvo E. M., Pinheiro L. C. & Ferreira V. M.

Figure 1 – *Lapa do Boqueirão Cave, Cerrado, Vila Propício, Goiás, Brazil.* a. Geographical location. b. Sketch of the cave. c-k. Detalhes da caverna e pontos de coleta. Photos: de Oliveira P. H. F. & Bezerra J. D. P.; Cave sketch: Calvo E. M., Pinheiro L. C. & Ferreira V. M.

Identificação das espécies de *Penicillium*

Análise morfológica de 20 isolados (dos 39 representantes) foi realizada em cultivo em ágar extrato de malte (MEA) e em ágar Czapek-Dox com extrato de levedura (CYA) e placas incubadas a 25°C por 7 dias no escuro (Samson *et al.*, 2010). Para identificação molecular, isolados cultivados em MEA foram utilizados para extração do DNA genômico utilizando o *Kit Wizard® Genomic DNA Purification* (Promega Corporation, Madison, WI, EUA), seguindo o protocolo do fabricante. Foram utilizados os *primers* ITS4 e ITS5 (White *et al.*, 1990) para amplificação da região ITS do rDNA. Reações de PCR, purificação e sequenciamento foram realizadas conforme descrito por Bezerra *et al.* (2017). As sequências obtidas foram editadas manualmente utilizando o MEGA v.11 (Tamura *et al.*, 2021) e submetidas ao *GenBank* do NCBI utilizando a ferramenta *BLASTn* a fim de buscar sequências relacionadas. A busca de espécies filogeneticamente próximas às obtidas no nosso estudo, montagem do alinhamento e análise filogenética foi realizada de acordo com Houbraken *et al.* (2020). As sequências selecionadas foram alinhadas com as sequências dos isolados de *Penicillium* obtidas no nosso estudo utilizando a plataforma MAFFT (Katoh *et al.*, 2019). A árvore filogenética com base na análise de máxima verossimilhança (ML) foi construída como descrito por Bezerra *et al.* (2017) e valores de suporte acima de 60% foram considerados estatisticamente significativos e incluídos próximo dos nós. Sequências obtidas no nosso estudo foram depositadas no *GenBank* (OQ332383-OQ332402).

Identification of *Penicillium* species

*Morphological analysis of 20 isolates (out of 39 representatives) was carried out on malt extract agar (MEA) and Czapek-Dox agar with yeast extract (CYA) with Petri dishes incubated for 7 days in the dark at 25°C (Samson et al., 2010). For molecular identification, isolates grown on MEA were used to extract genomic DNA using the Wizard® Genomic DNA Purification Kit (Promega Corporation, Madison, WI, USA), following the manufacturer's protocol. Primers ITS4 and ITS5 (White et al., 1990) were used to amplify the ITS region of the rDNA. PCR reactions, purification and sequencing were carried out as described by Bezerra et al. (2017). The sequences obtained were manually edited using MEGA v.11 (Tamura et al., 2021) and submitted to NCBI's GenBank using the BLASTn tool in order to search for related sequences. The search for phylogenetically close species to those obtained in the study, alignment assembly and phylogenetic analysis were carried out according to Houbraken et al. (2020). Using the MAFFT platform (Katoh et al., 2019), the selected sequences were aligned with the *Penicillium* isolates sequences obtained in the study. The phylogenetic tree based on maximum likelihood (ML) analysis was constructed as described by Bezerra et al. (2017) and support values above 60% were considered statistically significant and included near the nodes. Sequences obtained in the study have been deposited in GenBank (OQ332383-OQ332402).*

Riqueza de espécies de *Penicillium*

Para mensurar a riqueza e abundância de espécies de *Penicillium* na caverna Lapa do Boqueirão, o número de colônias (UFC) obtidas de cada espécie foi considerado a abundância e o número de espécies identificadas foi considerado a riqueza. Os dados sobre a riqueza e abundância de espécies foram observados para todos os pontos de coleta (1-8) e o substrato de onde os fungos foram isolados (ar e sedimento).

RESULTADOS

Riqueza de espécies de *Penicillium*

No total, foram contabilizadas 890 UFC, das quais 178 (ar = 100 e sedimento = 78) foram previamente identificadas como pertencentes ao gênero *Penicillium*. Dos 39 representantes, foram selecionados e analisados 20 isolados com base em características macro e microscópicas nos meios de cultura CYA e MEA (Figura 2). Utilizando sequências de ITS do rDNA, foram realizadas buscas no *GenBank* do NCBI via ferramenta *BLASTn* que confirmaram a identificação prévia dos isolados. A análise filogenética de ML das sequências obtidas no nosso estudo (Figura 3) demonstrou que os isolados pertencem a 12 espécies de *Penicillium* de cinco seções (*Brevi-compacta*, *Citrina*, *Lanata-Divaricata*, *Exilicaulis* e *Ramosum*), sendo a seção *Citrina* a que apresentou o maior número de espécies (seis), com destaque para *P. sumatraense* com a maior abundância (Tabela 1). Apesar de serem consideradas o código de barras para fungos, sequências de ITS nem sempre são suficientes para resolver a definição da maioria das espécies de *Penicillium*. Apesar disso, com base na nossa análise,

Penicillium species richness

To measure the richness and abundance of *Penicillium* species in the Lapa do Boqueirão cave, the number of colonies (CFU) obtained from each species was considered abundance and the number of species identified was considered richness. The data on species richness and abundance were observed for all the collection points (1-8) in addition to the substrate from which the fungi were isolated (air and sediment).

RESULTS

Richness of *Penicillium* species

A total of 890 CFUs were counted, of which 178 (air = 100 and sediment = 78) were previously identified as belonging to the genus *Penicillium*. Of the 39 representatives, 20 isolates were selected and analyzed based on macro and microscopic characteristics on CYA and MEA culture media (Figure 2). Using ITS rDNA sequences, searches were carried out on NCBI's *GenBank* via the *BLASTn* tool, which confirmed the previous identification of the isolates. The ML phylogenetic analysis of the sequences obtained (Figure 3) showed that the isolates belong to 12 species of *Penicillium* from five sections (*Brevi-compacta*, *Citrina*, *Lanata-Divaricata*, *Exilicaulis* and *Ramosum*), with the *Citrina* section having the highest number of species (six), and *P. sumatraense* having the highest abundance (Table 1). Despite being considered the barcode for fungi, ITS sequences are not always sufficient to resolve the definition of most *Penicillium* species. Nevertheless, specific identification was not possible for only four isolates considering phylogenetic analysis alone. When combining morphological and molecular data, it was possible to identify the isolates as *P.*

somente com quatro isolados não foi possível a identificação específica considerando apenas a análise filogenética. Quando associado os dados morfológicos e moleculares, foi possível identificar os isolados como *P. cf. brevicompactum* (1), *P. cf. kongii* (2) e *P. cf. tropicum* (1). Das 12 espécies de *Penicillium* encontradas no nosso estudo, seis delas (*P. kongii*, *P. shearii*, *P. striatisporum*, *P. sumatraense*, *P. terrigenum* e *P. tropicum*) estão sendo relatadas pela primeira vez em cavernas de todo mundo, o que ressalta o tesouro fúngico escondido em cavernas brasileiras.

cf. brevicompactum (1), *P. cf. kongii* (2) and *P. cf. tropicum* (1). Of the 12 *Penicillium* species found, six of them (*P. kongii*, *P. shearii*, *P. striatisporum*, *P. sumatraense*, *P. terrigenum* and *P. tropicum*) are being reported for the first time in caves worldwide, which highlights the fungal treasure hidden in Brazilian caves.

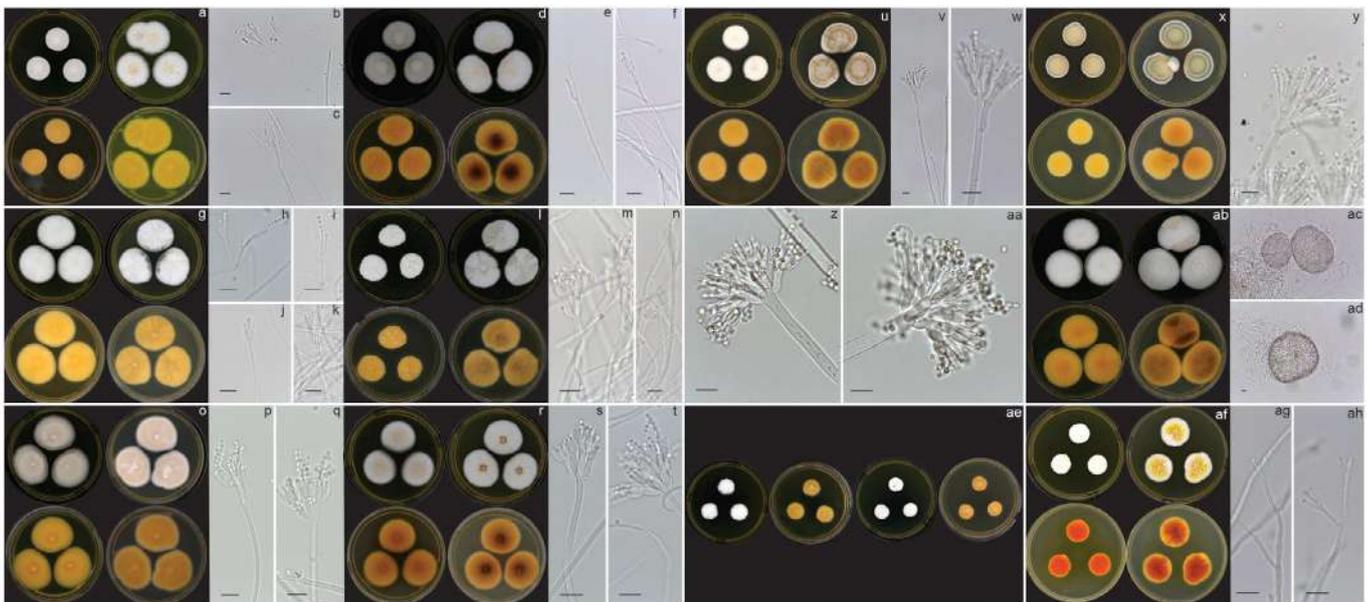


Figura 2 – Macro e micromorfologia de espécies de *Penicillium* isoladas do ar e/ou sedimento da Caverna Lapa do Boqueirão, Cerrado goiano, Vila Propício, Goiás, Brasil cultivadas em MEA e CYA (frente e verso) a 25°C por 7 dias no escuro. a-c. *P. citrinum*. d-f. *P. shearii*. g-k. *P. copticola*. l-n. *P. cf. tropicum*. o-q. *P. sumatraense*. r-t. *P. terrigenum*. u-w. *P. cf. brevicompactum*. x-y. *P. cf. kongii*. z-aa. *P. olsonii*. ab-ad. *P. javanicum*. ae. *P. striatisporum*. af-ah. *P. virgatum*. Barra de escala: 10 µm

Figure 2 – Macro and micromorphology of *Penicillium* species isolated from the air and/or sediment of Lapa do Boqueirão Cave, Cerrado, Vila Propício, Goiás, Brazil grown on MEA and CYA (surface and reverse) at 25°C for 7 days in the dark. a-c. *P. citrinum*. d-f. *P. shearii*. g-k. *P. copticola*. l-n. *P. cf. tropicum*. o-q. *P. sumatraense*. r-t. *P. terrigenum*. u-w. *P. cf. brevicompactum*. x-y. *P. cf. kongii*. z-aa. *P. olsonii*. ab-ad. *P. javanicum*. ae. *P. striatisporum*. af-ah. *P. virgatum*. Scale bars: 10 µm..

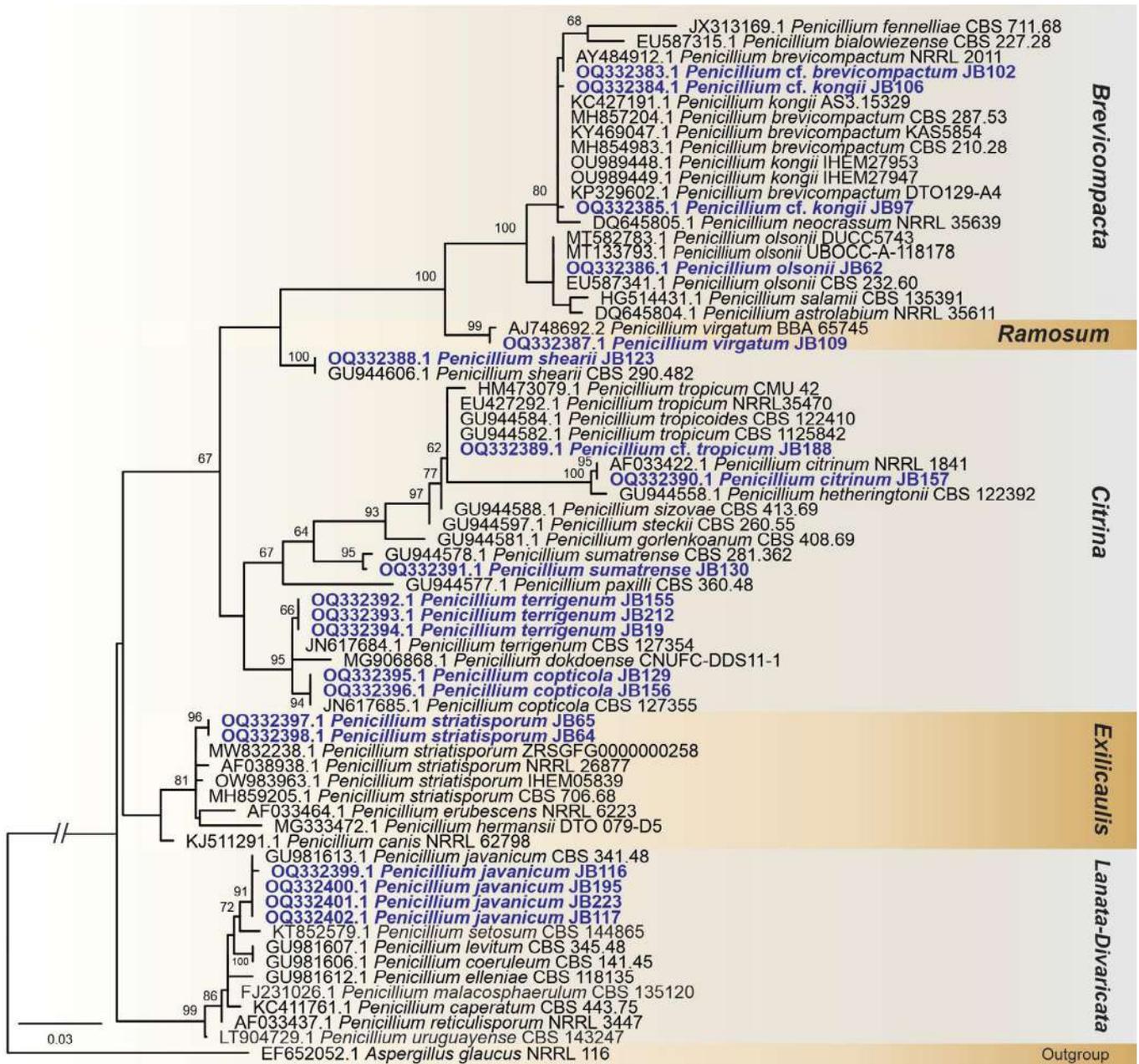


Figura 3 - Árvore de máxima verossimilhança (ML) utilizando seqüências de ITS do rDNA de isolados de *Penicillium* obtidos do ar e/ou sedimento da Caverna Lapa do Boqueirão, Cerrado goiano, Vila Propício, Goiás, Brasil. Isolados obtidos no nosso estudo estão destacados na cor azul e negrito. Valores de suporte iguais ou maiores que 60% estão incluídos próximos dos nós. *Aspergillus glaucus* NRRL 116 foi utilizada como grupo externo.

Figure 3 - Maximum likelihood (ML) tree using ITS rDNA sequences of *Penicillium* isolates obtained from the air and/or sediment of Lapa do Boqueirão Cave, Cerrado, Vila Propício, Goiás, Brazil. Isolates obtained in this study are highlighted in blue and bold. Support values equal to or greater than 60% are included next to the nodes. *Aspergillus glaucus* NRRL 116 was used as an outgroup.

Tabela 1 – Riqueza e abundância (UFC) de espécies de *Penicillium* isoladas do ar e/ou sedimento da Caverna Lapa do Boqueirão, Cerrado goiano, Vila Propício, Goiás, Brasil. Espécies relatadas pela primeira vez em cavernas estão indicadas (▲) na coluna “Novo relato”. Abundância de espécies está indicada para o substrato (Ar/Sedimento) e ponto de coleta (1-8, sendo os pontos 1 e 8 externos). Hífen (-) indica a ausência do fungo.

Espécie	Seção de <i>Penicillium</i>	Novo relato	Ar/Sedimento								Total
			Pontos de coleta								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
<i>P. cf. brevicompactum</i>	<i>Brevicompacta</i>		20/0	-	-	-	-	2/0	-	-	22/0
<i>P. citrinum</i>	<i>Citrina</i>		-	-	-	-	-	-	-	4/0	4/0
<i>P. copticola</i>	<i>Citrina</i>		-	-	-	-	-	-	2/0	0/4	2/4
<i>P. javanicum</i>	<i>Lanata-Divaricata</i>		4/1	0/1	0/2	-	0/2	-	-	-	4/6
<i>P. cf. kongii</i>	<i>Brevicompacta</i>	▲	-	-	-	21/0	1/0	-	-	1/0	23/0
<i>P. olsonii</i>	<i>Brevicompacta</i>		10/0	5/0	2/0	-	-	-	2/0	0/9	19/9
<i>P. shearii</i>	<i>Citrina</i>	▲	0/9	-	-	-	-	-	-	-	0/9
<i>P. striatisporum</i>	<i>Exilicaulis</i>	▲	-	-	-	0/1	-	-	-	-	0/1
<i>P. sumatraense</i>	<i>Citrina</i>	▲	0/3	2/0	-	-	19/0	4/0	-	0/12	25/15
<i>P. terrigenum</i>	<i>Citrina</i>	▲	-	-	1/2	0/8	-	-	-	-	1/10
<i>P. cf. tropicum</i>	<i>Citrina</i>	▲	-	0/3	0/6	-	-	-	-	0/8	0/17
<i>P. virgatum</i>	<i>Ramosum</i>		-	0/4	0/2	-	-	-	-	0/1	0/7
		Abundância	34/13	7/8	3/12	21/9	20/2	6/0	4/0	5/34	100/78
		Riqueza	5	5	5	3	3	2	2	7	12

Table 1 – Richness and abundance (CFU) of *Penicillium* species isolated from the air and/or sediment of Lapa do Boqueirão Cave, Cerrado, Vila Propício, Goiás, Brazil. Species reported for the first time in caves are indicated (▲) in the “New record” column. Species abundance is indicated for substrate (Air/Sediment) and collection points (1-8, points 1 and 8 being external). Hyphen (-) indicates the absence of the fungus.

Species	<i>Penicillium</i> Section	New record	Air/Sediments								Total
			Collection points								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
<i>P. cf. brevicompactum</i>	<i>Brevicompacta</i>		20/0	-	-	-	-	2/0	-	-	22/0
<i>P. citrinum</i>	<i>Citrina</i>		-	-	-	-	-	-	-	4/0	4/0
<i>P. copticola</i>	<i>Citrina</i>		-	-	-	-	-	-	2/0	0/4	2/4
<i>P. javanicum</i>	<i>Lanata-Divaricata</i>		4/1	0/1	0/2	-	0/2	-	-	-	4/6
<i>P. cf. kongii</i>	<i>Brevicompacta</i>	▲	-	-	-	21/0	1/0	-	-	1/0	23/0
<i>P. olsonii</i>	<i>Brevicompacta</i>		10/0	5/0	2/0	-	-	-	2/0	0/9	19/9
<i>P. shearii</i>	<i>Citrina</i>	▲	0/9	-	-	-	-	-	-	-	0/9
<i>P. striatisporum</i>	<i>Exilicaulis</i>	▲	-	-	-	0/1	-	-	-	-	0/1
<i>P. sumatraense</i>	<i>Citrina</i>	▲	0/3	2/0	-	-	19/0	4/0	-	0/12	25/15
<i>P. terrigenum</i>	<i>Citrina</i>	▲	-	-	1/2	0/8	-	-	-	-	1/10
<i>P. cf. tropicum</i>	<i>Citrina</i>	▲	-	0/3	0/6	-	-	-	-	0/8	0/17
<i>P. virgatum</i>	<i>Ramosum</i>		-	0/4	0/2	-	-	-	-	0/1	0/7
		Abundance	34/13	7/8	3/12	21/9	20/2	6/0	4/0	5/34	100/78
		Richness	5	5	5	3	3	2	2	7	12

Checklist de espécies de *Penicillium* encontradas na Caverna Lapa do Boqueirão

Penicillium brevicompactum Dierckx, Ann. Soc. Sci. Bruxelles 25: 88 (1901)

Substrato/hospedeiro e local de origem: Desconhecido.

Distribuição: Cosmopolita.

Ocorrência em cavernas: África do Sul, Bélgica, Brasil, Cazaquistão, Israel, Itália, Coreia, Polônia, República Tcheca, Rússia, Ucrânia (Taylor *et al.*, 2013; Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comentários: *Penicillium brevicompactum* apresenta ampla distribuição em cavernas pelo mundo, incluindo no Brasil (Taylor *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2022). No ambiente cavernícola, essa espécie pode ser encontrada em sedimento/solo, água, insetos, parede da caverna, madeira e ar (Vanderwolf *et al.*, 2013). Além disso, *P. brevicompactum* está presente no ar de outros ambientes e pode ser comumente isolada de alimentos, apresentando grande importância por produzir a micotoxina ácido micofenólico (Ndagijimana *et al.*, 2008), ser utilizada na produção de medicamentos imunossupressores (Regueira *et al.*, 2011) e relacionada com alguns raros casos de micoses oportunistas em mamíferos (de Hoog *et al.*, 2020).

Penicillium citrinum Thom, Bull. U.S. Department of Agriculture, Bureau Animal Industry 118: 61 (1910)

Substrato/hospedeiro e local de origem: Desconhecido.

Distribuição: Cosmopolita.

Ocorrência em cavernas: África do Sul, Brasil, Eslováquia, Eslovênia, Israel, Kazaquistão, Polônia,

Checklist of *Penicillium* species found in Lapa do Boqueirão Cave

Penicillium brevicompactum Dierckx, Ann. Soc. Sci. Bruxelles 25: 88 (1901)

Substrate/host and place of origin: Unknown.

Distribution: Cosmopolitan.

Occurrence in caves: South Africa, Belgium, Brazil, Kazakhstan, Israel, Italy, Korea, Poland, Czech Republic, Russia, Ukraine (Taylor *et al.*, 2013; Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comments: *Penicillium brevicompactum* has a wide distribution in caves around the world, including in Brazil (Taylor *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2022). In the cave environment, this species can be found in sediment/soil, water, insects, the cave wall, wood and air (Vanderwolf *et al.*, 2013). In addition, *P. brevicompactum* is present in the air of other environments and can be commonly isolated from food, presenting great importance for producing the mycotoxin mycophenolic acid (Ndagijimana *et al.*, 2008), which is used in the production of immunosuppressive drugs (Regueira *et al.*, 2011). In addition, it is related to some rare cases of opportunistic mycoses in mammals (de Hoog *et al.*, 2020).

Penicillium citrinum Thom, Bull. U.S. Department of Agriculture, Bureau Animal Industry 118: 61 (1910)

Substrate/host and place of origin: Unknown.

Distribution: Cosmopolitan.

Occurrence in caves: South Africa, Brazil, Slovakia, Slovenia, Israel, Kazakhstan, Poland, Czech Republic

República Tcheca (Cunha *et al.*, 2020; Taylor *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2022; Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comentários: *Penicillium citrinum* está distribuída mundialmente e foi relatada em outros estudos de cavernas no Brasil (Alves *et al.*, 2022). No ambiente cavernícola essa espécie foi isolada de solo/sedimento, insetos, ar, guano e parede da caverna. *Penicillium citrinum* pode ser comumente isolada de alimentos como cereais e especiarias (Houbraken *et al.*, 2011). Além disso, é uma espécie que pode produzir micotoxinas capazes de ocasionar intoxicação alimentar em humanos (Houbraken *et al.*, 2010) e há relatos de casos de infecção oportunista nos pulmões, endoftalmite e infecção cutânea (de Hoog *et al.*, 2020).

Penicillium copticola Houbraken, Frisvad & Samson, Stud. Mycol. 70: 88 (2011)

Substrato/hospedeiro e local de origem: tortilha, Estados Unidos.

Distribuição: África do Sul, Bolívia, Brasil, Finlândia, México, República da Coreia e Tanzânia.

Ocorrência em cavernas: Brasil (Alves *et al.* 2022).

Comentários: Para o nosso conhecimento, *P. copticola* foi relatada apenas uma vez em caverna no Brasil (Alves *et al.*, 2022), sendo este estudo o segundo relato de ocorrência da espécie em cavernas mundialmente. Trata-se de uma espécie que tem atraído interesse científico para estudos relacionados à produção da enzima tirosinase (Maamoun *et al.*, 2021).

(Cunha *et al.*, 2020; Taylor *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2022; Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comments: *Penicillium citrinum* has a worldwide distribution and has been reported in other cave studies in Brazil (Alves *et al.*, 2022). In the cave environment, this species has been isolated from soil/sediment, insects, air, guano and the cave wall. *Penicillium citrinum* can be commonly isolated from foods such as cereals and spices (Houbraken *et al.*, 2011). In addition, it can produce mycotoxins capable of causing food poisoning in humans (Houbraken *et al.*, 2010) and there are reported cases of opportunistic infection in the lungs, endophthalmitis and skin infection (de Hoog *et al.*, 2020).

Penicillium copticola Houbraken, Frisvad & Samson, Stud. Mycol. 70: 88 (2011)

Substrate/host and place of origin: tortilla, United States.

Distribution: South Africa, Bolivia, Brazil, Finland, Mexico, Republic of Korea and Tanzania.

Occurrence in caves: Brazil (Alves *et al.* 2022).

Comments: Apparently, *P. copticola* has only been reported once in a Brazilian cave (Alves *et al.*, 2022), and this study is the second record of the species occurring in caves worldwide. It is a species that has attracted scientific interest for studies related to the production of the tyrosinase enzyme (Maamoun *et al.*, 2021).

Penicillium javanicum J.F.H. Beyma, Verh. K. Akad. Wet., tweede sect. 26(4): 17 (1929)

Substrato/hospedeiro e local de origem: Raízes vivas de *Thea sinensis*, Indonésia.

Distribuição: Argentina, Austrália, Brasil, Camarões, Colômbia, Estados Unidos, Índia e Indonésia.

Ocorrência em cavernas: Eslováquia, Itália (Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comentários: *Penicillium javanicum* foi isolada de solo/sedimento de cavernas (Vanderwolf *et al.*, 2013). Trata-se de um fungo também isolado de raízes de plantas (Lai *et al.*, 2023), associado a manguezais (Liang *et al.*, 2019) e solo (Barbosa *et al.*, 2022). Além disso, há relatos dessa espécie na produção de substâncias com atividades biológicas (ex. antibacterianas, anti-inflamatórias e antifúngicas) (Liang *et al.*, 2020; Lai *et al.*, 2023; Liang *et al.*, 2019).

Penicillium kongii L. Wang, Mycologia 105(6): 1549 (2014) [2013]

Substrato/hospedeiro e local de origem: folhas de *Quercus aquifolioides*, Tibete.

Distribuição: Cosmopolita.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: Apesar de *P. kongii* possuir ampla distribuição mundial, sendo isolada comumente de material vegetal (Liu *et al.*, 2017; Wang & Wang, 2017), trata-se do primeiro relato no ambiente cavernícola onde foi isolada do ar. O estudo de metabólitos secundários produzidos por essa espécie indica a possibilidade de novos compostos de interesse na indústria farmacológica para tratamento de câncer (Liu *et al.*, 2017).

Penicillium javanicum J.F.H. Beyma, Verh. K. Akad. Wet., tweede sect. 26(4): 17 (1929)

Substrate/host and place of origin: Live roots of *Thea sinensis*, Indonesia.

Distribution: Argentina, Australia, Brazil, Cameroon, Colombia, United States, India and Indonesia.

Occurrence in caves: Slovakia, Italy (Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comments: *Penicillium javanicum* has been isolated from cave soil/sediment (Vanderwolf *et al.*, 2013). This fungus has also been isolated from plant roots (Lai *et al.*, 2023), associated with mangroves (Liang *et al.*, 2019) and soil (Barbosa *et al.*, 2022). In addition, this species has been reported to produce substances with biological activities (e.g. antibacterial, anti-inflammatory and antifungal) (Liang *et al.*, 2020; Lai *et al.*, 2023; Liang *et al.*, 2019).

Penicillium kongii L. Wang, Mycologia 105(6): 1549 (2014) [2013]

Substrate/host and place of origin: *Quercus aquifolioides* leaves, Tibet.

Distribution: Cosmopolitan.

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Comments: Although *P. kongii* has a wide distribution worldwide, being commonly isolated from plant material (Liu *et al.*, 2017; Wang & Wang, 2017), this is the first report in the cave environment where it has been isolated from the air. The study of secondary metabolites produced by this species indicates the possibility of new compounds of interest in the pharmacological industry for cancer treatment (Liu *et al.*, 2017).

Penicillium olsonii Bainier & Sartory [as 'olsoni'], *Annls mycol.* 10(4): 398 (1912)

Substrato/hospedeiro e local de origem: *Musa*, França.

Distribuição: África do Sul, Canadá, Finlândia, Itália, República da Coreia e Uganda.

Ocorrência em cavernas: China (Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comentários: *Penicillium olsonii* foi relatada em estudos de caverna na China sendo isolada exclusivamente do ar (Vanderwolf *et al.*, 2013). Esta é a primeira ocorrência de *P. olsonii* em cavernas do Brasil, de onde foi obtida do ar. Essa espécie foi associada à produção de enzimas (Tranchimand *et al.*, 2005; Tranchimand *et al.*, 2008) importantes para a indústria de alimentos e bebidas (Wagner; Kusserow; Schäfer, 2000). Existem relatos de utilização de *P. olsonii* no controle biológico de doenças em plantas (Latz *et al.*, 2020).

Penicillium shearii Stolk & D.B. Scott, *Persoonia* 4(4): 396 (1967)

Substrato/hospedeiro e local de origem: Solo, Honduras.

Distribuição: Brasil, Colômbia e Índia.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: *Penicillium shearii* é uma espécie comumente isolada do solo (Khandavilli *et al.*, 2016; Brito, 2015) e está aqui sendo relatada pela primeira vez em caverna, onde foi obtida de solo/sedimento de caverna brasileira. *Penicillium shearii* foi utilizada no estudo de nanopartículas para possíveis aplicações na medicina (Fageria *et al.*, 2017).

Penicillium olsonii Bainier & Sartory [as 'olsoni'], *Annls mycol.* 10(4): 398 (1912)

Substrate/host and place of origin: *Musa*, France.

Distribution: South Africa, Canada, Finland, Italy, Republic of Korea and Uganda.

Occurrence in caves: China (Vanderwolf *et al.*, 2013).

Comments: *Penicillium olsonii* has been reported in cave studies in China being isolated exclusively from the air (Vanderwolf *et al.*, 2013). This is the first cave occurrence of *P. olsonii* in Brazil, where it was obtained from the air. This species has been associated with the production of enzymes (Tranchimand *et al.*, 2005; Tranchimand *et al.*, 2008) that are important for the food and beverage industry (Wagner; Kusserow; Schäfer, 2000). There are reports of *P. olsonii* being used in the biological control of plant diseases (Latz *et al.*, 2020).

Penicillium shearii Stolk & D.B. Scott, *Persoonia* 4(4): 396 (1967)

Substrate/host and place of origin: Soil, Honduras.

Distribution: Brazil, Colombia and India.

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Comments: *Penicillium shearii* is a species commonly isolated from soil (Khandavilli *et al.*, 2016; Brito, 2015) and is being reported in caves for the first time. *Penicillium shearii* has been used in the nanoparticles study for possible applications in medicine (Fageria *et al.*, 2017).

Penicillium striatisporum Stolk, Antonie van Leeuwenhoek 35: 268 (1969)

Substrato e local de origem: Folhas caídas de *Acacia karroo*, África do Sul.

Distribuição: Índia.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: *Penicillium striatisporum* tem sido isolada de diferentes hospedeiros/substratos e é relatada com potencial antifúngico (Ma et al., 2008). No nosso estudo, *P. striatisporum* está sendo relatada pela primeira vez em caverna, de onde foi isolada do solo/sedimento.

Penicillium sumatraense Svilv. [as 'sumatrense'], Arch. Hydrobiol. 14(Suppl. 3): 535 (1936)

Substrato e local de origem: Solo, Sumatra.

Distribuição: Cosmopolita.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: Poucos estudos relatam o isolamento de *P. sumatraense*, sendo alguns deles sobre o possível potencial de produção de moléculas bioativas (Hsi et al., 2022) ou isolamento de substratos/hospedeiros incomuns (Smiri et al., 2021). Nosso relato trata-se da primeira ocorrência de *P. sumatraense* em caverna.

Penicillium terrigenum Houbraken, Frisvad & Samson, Stud. Mycol. 70: 125 (2011)

Substrato e local de origem: Solo, Havaí.

Distribuição: Bolívia, Brasil, Coréia do Sul, Panamá e Tailândia.

Penicillium striatisporum Stolk, Antonie van Leeuwenhoek 35: 268 (1969)

Substrate and place of origin: Fallen leaves of *Acacia karroo*, South Africa.

Distribution: India.

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Comments: *Penicillium striatisporum* has been isolated from different hosts/substrates and is reported to have antifungal potential (Ma et al., 2008). In this study, *P. striatisporum* is being reported for the first time in a cave, from where it was isolated from soil/sediment.

Penicillium sumatraense Svilv. [as 'sumatrense'], Arch. Hydrobiol. 14(Suppl. 3): 535 (1936)

Substrate and place of origin: Soil, Sumatra.

Distribution: Cosmopolitan.

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Comments: Few studies have reported the isolation of *P. sumatraense*, some of them on the possible potential for the production of bioactive molecules (Hsi et al., 2022) or isolation from unusual substrates/hosts (Smiri et al., 2021). This report is the first cave occurrence of *P. sumatraense*.

Penicillium terrigenum Houbraken, Frisvad & Samson, Stud. Mycol. 70: 125 (2011)

Substrate and place of origin: Soil, Hawaii.

Distribution: Bolivia, Brazil, South Korea, Panama and Thailand.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: *Penicillium terrigenum* é normalmente isolada do solo e substratos relacionados (Park *et al.*, 2019), existindo poucos relatos de isolamento de outros substratos/hospedeiros (Punja, 2020), ambientes marinhos (Gonçalves *et al.*, 2019), macroalgas e verificação de atividade enzimática (Park *et al.*, 2016). O presente estudo é a primeira ocorrência de *P. terrigenum* em caverna.

Penicillium tropicum Houbraken, Frisvad & Samson, Fungal Diversity 44: 129 (2010)

Substrato e local de origem: Solo de cultivo de *Coffea arabica*, Índia.

Distribuição: Costa Rica, Equador, Ilhas Galápagos e Índia.

Ocorrência em cavernas: Esta é a primeira ocorrência.

Comentários: Trata-se da primeira ocorrência de *P. tropicum* em caverna. No nosso estudo, *P. cf. tropicum* foi isolada de sedimento. *Penicillium tropicum* tem sido isolada principalmente de solos tropicais e subtropicais (Houbraken *et al.*, 2010) e poucos relatos diferem desse substrato (Zeng *et al.*, 2016).

Penicillium virgatum Nirenberg & Kwaśna, Mycol. Res. 109(9): 977 (2005)

Substrato e local de origem: Solo de cultivo de *Glycine max*, Nova Caledônia.

Distribuição: Cosmopolita.

Ocorrência em cavernas: Brasil (da Costa, 2015).

Comentários: *Penicillium virgatum* é amplamente distribuída pelo mundo, sendo principalmente isolada do solo (Kwaśna & Nirenberg, 2005; de

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Comments: *Penicillium terrigenum* is usually isolated from soil and related substrates (Park *et al.*, 2019), with few reports from other substrates/hosts (Punja, 2020), marine environments (Gonçalves *et al.*, 2019), macroalgae and verification of enzymatic activity (Park *et al.*, 2016). This study is the first cave occurrence of *P. terrigenum*.

Penicillium tropicum Houbraken, Frisvad & Samson, Fungal Diversity 44: 129 (2010)

Substrate and place of origin: *Coffea arabica* growing soil, India.

Distribution: Costa Rica, Ecuador, Galapagos Islands and India.

Occurrence in caves: This is the first occurrence.

Observations: This is the first occurrence of *P. tropicum* in a cave. In this study, *P. cf. tropicum* was isolated from sediment. *Penicillium tropicum* has been mainly isolated from tropical and subtropical soils (Houbraken *et al.*, 2010) and few reports differ from this substrate (Zeng *et al.*, 2016).

Penicillium virgatum Nirenberg & Kwaśna, Mycol. Res. 109(9): 977 (2005)

Substrate and place of origin: *Glycine max* growing soil, New Caledonia.

Distribution: Cosmopolitan.

Occurrence in caves: Brazil (da Costa, 2015).

Comments: *Penicillium virgatum* is widely distributed throughout the world, being mainly isolated from soil (Kwaśna & Nirenberg, 2005; de Souza,

Souza, 2018; da Costa, 2015) e foi relatada em solo de cavidades naturais em Minas Gerais-Brasil (da Costa, 2015). Além disso, tem sido relatada com potencial para produção de moléculas bioativas (Li *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2021).

DISCUSSÃO

Espécies de *Penicillium* possuem distribuição mundial, atuam como importantes decompositores da matéria orgânica e são encontrados em ambientes naturais e fechados e produtos alimentícios (Frisvad, 2014). Fungos desse gênero são amplamente utilizados com potencial econômico em diferentes indústrias (Gupta & Rodriguez-Couto, 2017). Além disso, algumas espécies são produtoras de micotoxinas e relatadas causando danos na agricultura (Houbraken *et al.* 2020; Samson *et al.* 2010) e micoses oportunistas em humanos e outros animais (de Hoog *et al.*, 2020). No ambiente cavernícola, as espécies de *Penicillium* estão entre as mais relatadas em diferentes substratos e hospedeiros (Vanderwolf *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2022). Contudo, registros oficiais da Flora e Funga do Brasil só reportam três espécies no bioma Cerrado (Flora e Funga do Brasil, 2023).

No nosso estudo, foram obtidas 890 UFC, das quais 178 (100 = ar e 78 = sedimento) foram identificadas como *Penicillium*, o que representa 20% do total. A riqueza de 12 espécies de *Penicillium* foi relatada a partir do isolamento de fungos do ar e sedimento de caverna do Cerrado no Brasil, sendo a seção *Citrina* a que apresentou maior abundância e número de espécies. Além disso, foi possível observar que os pontos de coleta definidos na caverna diferiram quanto a abundância e riqueza de espécies, especialmente

2018; da Costa, 2015) and has been reported in soil from caves in Minas Gerais-Brazil (da Costa, 2015). It has also been reported to have the potential to produce bioactive molecules (Li *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2021).

DISCUSSION

Penicillium species have a worldwide distribution, act as important decomposers of organic matter and are found in natural and closed environments and food products (Frisvad, 2014). Fungi of this genus are widely used with economic potential in different industries (Gupta & Rodriguez-Couto, 2017). In addition, some species are mycotoxin producers and have been reported to cause damage in agriculture (Houbraken *et al.* 2020; Samson *et al.* 2010) and opportunistic mycoses in humans and other animals (de Hoog *et al.*, 2020). In the cave environment, *Penicillium* species are among the most reported on different substrates and hosts (Vanderwolf *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2022). Nevertheless, official records from Brazilian Flora and Fungi only report three species in the Cerrado biome (Flora e Funga do Brasil, 2023).

In our study, 890 CFU were obtained, of which 178 (100 = air and 78 = sediment) were identified as *Penicillium*, which represents 20% of the total. A richness of 12 *Penicillium* species has been reported from the isolation of fungi from the air and sediment of Cerrado caves in Brazil, with the section *Citrina* showing the greatest abundance and number of species. In addition, it was possible to observe that the collection points defined in the cave differed in terms of abundance and species richness, especially the external points which showed the highest species richness and abundance. The highlight of this study is the

os pontos externos que apresentaram maior riqueza e abundância de espécies. O destaque deste estudo está no relato de seis espécies de *Penicillium* nunca observadas no ambiente cavernícola e/ou no Brasil (Vanderwolf *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017; Cunha *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Alves *et al.*, 2022).

Estudos verificando a riqueza e abundância de fungos em cavernas têm demonstrado que os diferentes espaços do ecossistema cavernícola podem possuir um número de espécies constante ou variável, principalmente quando são considerados os substratos, hospedeiros e correntes de ar (Cunha *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2022). Semelhante ao nosso estudo, Taylor *et al.* (2014) e Alves *et al.* (2022) verificaram que pontos de coletas externos ou mais próximos das entradas das cavernas possuem a maior abundância e/ou riqueza de fungos. Sabe-se que fatores bióticos e abióticos, como a maior disponibilidade de matéria orgânica, maior luminosidade e presença de morcegos, podem favorecer o desenvolvimento fúngico nas cavernas (Vanderwolf *et al.*, 2013; Cunha *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2022). Além disso, foi demonstrado que os fungos cavernícolas podem ser originários do ambiente externo (Zhang *et al.*, 2018) e a visita turística de cavernas pode auxiliar na entrada de espécies que ainda não estão presentes no ambiente (Zhelyazkova *et al.*, 2020).

Espécies de *Penicillium* da seção *Citrina* são encontradas em diferentes substratos e hospedeiros de todo o mundo, mas especialmente no solo (Houbraken *et al.*, 2011). Esta seção possui aproximadamente 43 espécies (Ashtekar *et al.*, 2022), incluindo novidades do Brasil (ex. *P. vascosobrinhoanum*, Barbosa *et al.*, 2020). A espécie mais abundante no nosso estudo, *P. sumatraense*, tem sido isolada de substratos/hospe-

record of six Penicillium species never observed in the cave environment and/or in Brazil (Vanderwolf et al., 2013; Zhang et al., 2017; Cunha et al., 2020; Zhang et al., 2021; Alves et al., 2022).

Studies verifying the richness and abundance of fungi in caves have shown that the different spaces of the cave ecosystem can have a constant or variable number of species, especially when substrates, hosts and air currents are taken into account (Cunha et al., 2020; Alves et al., 2022). Similar to this study, Taylor et al. (2014) and Alves et al. (2022) found that collection points outside or closest to cave entrances have the highest abundance and/or fungi richness. It is known that biotic and abiotic factors, such as the greater availability of organic matter, greater luminosity and the presence of bats, can favor fungal development in caves (Vanderwolf et al., 2013; Cunha et al., 2020; Alves et al., 2022). In addition, it has been shown that cave fungi can originate from the external environment (Zhang et al., 2018) and tourist visitation of caves can help introduce species that are not yet present in the environment (Zhelyazkova et al., 2020).

Penicillium species of the section Citrina are found on different substrates and hosts all over the world, but especially in soil (Houbraken et al., 2011). This section has approximately 43 species (Ashtekar et al., 2022), including novelties from Brazil (e.g. P. vascosobrinhoanum, Barbosa et al., 2020). Penicillium sumatraense, the most abundant species in this study, has been isolated from unusual substrates/hosts and is being reported for the first time in a cave environment (Smiri et al., 2021, Vanderwolf et al., 2013; Alves et al., 2022). In addition to their ecological and taxonomic importance, fungi from the section Citrina have also been reported to have biotechnological potential (Samson & Houbraken, 2011) and P. citrinum has been reported to cause opportunistic mycoses (de Hoog et al., 2020). The

deiros incomuns (Smiri *et al.*, 2021), nosso estudo está relatando esta espécie pela primeira vez em ambiente cavernícola (Vanderwolf *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2022). Além da importância ecológica e taxonômica, fungos da seção *Citrina* também têm sido relatados com potencial biotecnológico (Samson & Houbraken, 2011) e *P. citrinum* possui relatos causando micoses oportunistas (de Hoog *et al.*, 2020). A seção *Brevicompecta* compreende um outro grupo de fungos que merece destaque no nosso estudo, apresentou três espécies, *P. cf. brevicompactum*, *P. cf. kongii* e *P. olsonii*, com elevada abundância e uma delas como nova ocorrência em cavernas. Espécies de *Penicillium* da seção *Brevicompecta* são comumente encontradas no solo e no ar (Houbraken *et al.* 2020; Samson *et al.* 2010), existem relatos de atuarem como agentes etiológicos de micoses oportunistas (de Hoog *et al.*, 2020) e no Brasil têm sido obtidas de diferentes fontes, incluindo ar, água, folhas, solo e produtos alimentícios (Barbosa *et al.*, 2022).

Com relação às demais seções de *Penicillium* encontradas no nosso estudo, a seção *Lanata-Divaricata* possui cerca de 80 espécies principalmente isoladas do solo (Diao *et al.*, 2019), mas existem relatos de outros substratos/hospedeiros e no Brasil ocorrem como endófitos e em substratos relacionados com abelhas (Barbosa *et al.*, 2018, 2022). No nosso estudo, a seção *Exilicaulis* foi representada por *P. striatisporum*, sendo conhecida por fungos que contaminam ambientes fechados, podem causar alergias em humanos, produzir micotoxinas e possuir significância na saúde veterinária e na agricultura (Visagie *et al.*, 2016). No Brasil, espécies desta seção são relatadas do solo, águas, plantas e diversos outros substratos/hospedeiros em diferentes biomas (Barbosa *et al.*,

Brevicompecta section comprises another group of fungi that deserves to be highlighted in our study, presenting three species, *P. cf. brevicompactum*, *P. cf. kongii* and *P. olsonii*, with high abundance and one of them as a new occurrence in caves. *Penicillium* species from the section *Brevicompecta* are commonly found in soil and air (Houbraken *et al.* 2020; Samson *et al.* 2010), there are reports of them acting as etiological agents of opportunistic mycoses (de Hoog *et al.*, 2020) and in Brazil they have been obtained from different sources, including air, water, leaves, soil and food products (Barbosa *et al.*, 2022).

With regard to the other *Penicillium* sections found in this study, the section *Lanata-Divaricata* has around 80 species mainly isolated from soil (Diao *et al.*, 2019). However, there are reports of other substrates/hosts and in Brazil they occur as endophytes and on bee-related substrates (Barbosa *et al.*, 2018, 2022). In this study, section *Exilicaulis* was represented by *P. striatisporum*, which is known for fungi that contaminate closed environments, can cause allergies in humans, produce mycotoxins and have significance in veterinary health and agriculture (Visagie *et al.*, 2016). In Brazil, species from this section have been reported from soil, water, plants and various other substrates/hosts in different biomes (Barbosa *et al.*, 2022). Section *Ramosum* comprises about 20 species that are obtained from various substrates/hosts, such as air and herbivore excrement, however, it had a single representative, *P. virgatum* (Guevara-Suarez *et al.*, 2020). In Brazil there are reports in mangrove sediment, soil and plant litter (Barbosa *et al.*, 2022).

Brazilian caves mycobiota represents part of the national 'fungal treasure', providing information that makes it possible to implement strategies aimed at conserving the diversity of the cave environment.

2022). A seção *Ramosum* teve um único representante, *P. virgatum*, e compreende cerca de 20 espécies que são obtidas de diversos substratos/hospedeiros, tais como ar e excremento de herbívoros (Guevara-Suarez *et al.*, 2020) e no Brasil há relatos em sedimento de manguezal, solo e serrapilheira (Barbosa *et al.*, 2022).

A microbiota presente nas cavernas brasileiras representa parte do 'tesouro fúngico' nacional, fornecendo informações que viabilizem a execução de estratégias voltadas à conservação da diversidade do ambiente cavernícola. Seriam as cavernas brasileiras um hotspot da diversidade global de fungos? Os dados inventariados sobre a microbiota cavernícola são importantes subsídios para a elaboração de planos de manejo espeleológico (ex. "Plano de Manejo Espeleológico da Furna Nova, Baraúna/RN - Parque Nacional da Furna Feia", ICMBio/Cecav, 2023), auxiliando na atuação de órgãos de proteção do patrimônio espeleológico e proporcionando a conservação das espécies fúngicas e demais biota associada ao ambiente das cavernas, além de atuar na proteção da saúde de visitantes. Além disso, a preservação *ex situ* dos fungos favorece estudos relacionados às aplicações biotecnológicas, ecológicas e de taxonomia/inventário de fungos em cavernas brasileiras.

Durante o nosso estudo foi possível estimar uma riqueza de espécies de *Penicillium* até então desconhecida em cavernas, com destaque para *P. cf. kongii*, *P. shearii*, *P. striatisporum*, *P. sumatraense*, *P. terrigenum* e *P. cf. tropicum* que aqui estão sendo relatadas pela primeira vez no ambiente cavernícola e representam 50% da riqueza de espécies do nosso estudo. Estudos de avaliação da riqueza de fungos em cavernas do Brasil obtiveram resultados semelhantes (Alves *et al.*, 2022; Cunha *et al.* 2020), relatando

Could Brazilian caves be a global fungal diversity hotspot? The inventoried data on cave microbiota provides important inputs for drawing up cave management plans (e.g. "Furna Nova Cave Management Plan, Baraúna/RN - Furna Feia National Park", ICMBio/Cecav, 2023). The data supports the work of agencies protecting the cave heritage and helps the conservation of fungal species and other biota associated with the cave environment, as well as protecting the health of visitors. In addition, the ex situ preservation of fungi favors studies related to biotechnological, ecological and taxonomic applications/inventory of fungi in Brazilian caves.

*During this study, it was possible to estimate a richness of *Penicillium* species previously unknown in caves, especially *P. cf. kongii*, *P. shearii*, *P. striatisporum*, *P. sumatraense*, *P. terrigenum* and *P. cf. tropicum*, which represent 50% of the species richness of the study and are being reported in the cave environment for the first time. Studies evaluating the richness of caves fungi in Brazil have obtained similar results (Alves *et al.*, 2022; Cunha *et al.* 2020), which demonstrates the impact of this study in estimating the national and global diversity of fungi.*

cerca de 50% das espécies pela primeira vez em cavernas, o que demonstra o impacto do nosso estudo na estimativa da diversidade nacional e global de fungos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O nosso estudo apresenta importantes pistas para a descoberta de um tesouro ainda escondido na escuridão de cavernas brasileiras. A riqueza de espécies de *Penicillium*, fungos com distribuição mundial e associados com diversos hospedeiros/substratos, é uma parte da diversidade de fungos da Caverna Lapa do Boqueirão do Cerrado, Brasil. Entre as 12 espécies de *Penicillium* encontradas no presente estudo destacamos que 50% delas estão sendo relatadas a primeira vez em cavernas e/ou no Brasil, constituindo uma parte do tesouro micológico encontrado em cavernas. Além de os dados serem importante para estimativa da diversidade de fungos no Brasil e no mundo, o inventário da riqueza de espécies de *Penicillium* é importante para a preservação *in situ* e *ex situ* de recursos biológicos com potencial biotecnológico e fornecimento de informações micológicas para inclusão em plano de manejo de cavernas com potencial turístico no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Lorena Souza Miranda pelo auxílio na expedição científica para coleta de solo/sedimento da caverna e aos integrantes do Laboratório de Micologia (LabMicol) do IPTSP/UFG por todo o auxílio durante as atividades envolvidas neste estudo. Nós também queremos agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão

FINAL CONSIDERATIONS

This study presents important clues to the discovery of a treasure still hidden in the darkness of Brazilian caves. The richness of Penicillium species, fungi with a worldwide distribution and associated with diverse hosts/substrates, is part of the fungal diversity of the Lapa do Boqueirão Cave in the Cerrado. Of the 12 Penicillium species found in this study, 50% are being reported for the first time in caves and/or in Brazil, constituting part of the mycological treasure found in caves. In addition to the data being important for estimating the diversity of fungi in Brazil and worldwide, the inventory of the Penicillium species richness is important for the in situ and ex situ preservation of biological resources with biotechnological potential and the provision of mycological information for inclusion in management plans for caves with tourist potential in Brazil.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Lorena Souza Miranda for helping with the scientific expedition to collect soil/sediment from the cave and the members of the Laboratório de Micologia (LabMicol) at IPTSP/UFG for all their help during the activities involved in this study. We would also like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (Conselho Nacional de Desenvolvimento

da bolsa de Iniciação Científica (processo UFG/CNPq: PI05958-2022/1) e pelo apoio financeiro (processo CNPq: 408788/2021-6 e 404989/2021-7), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG, processo: CAP2022061000159) e ao TCCE ICMBio/VALE: Compensação Espeleológica (Subprojeto 19 - "Inventário de fungos em cavernas de UCs de biomas brasileiros: diversidade e subsídios para manejo espeleológico") pelo apoio financeiro. Cristina M. Souza-Motta e Jadson D. P. Bezerra são bolsistas do CNPq (processos: 311187/2022-6 e 303939/2022-2).

Científico e Tecnológico, CNPq) for awarding the Scientific Initiation scholarship (UFG/CNPq process: PI05958-2022/1) and for the financial support (CNPq process: 408788/2021-6 and 404989/2021-7), Goiás State Research Support Foundation (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás) (FAPEG, process: CAP2022061000159) and to TCCE ICMBio/VALE: Compensação Espeleológica (Subproject 19 - "Inventory of fungi in caves of UCs of Brazilian biomes: diversity and subsidies for speleological management") for the financial support. Cristina M. Souza-Motta and Jadson D. P. Bezerra are CNPq scholarship holders (processes: 311187/2022-6 and 303939/2022-2).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ALVES, V. C. S.; LIRA, R. A.; LIMA, J. M. S.; BARBOSA, R. N.; BENTO, D. M.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; SOUZA-MOTTA, C. M.; BEZERRA, J. D. P. Unravelling the fungal darkness in a tropical cave: richness and the description of one new genus and six new species. *Fungal Systematics and Evolution*, v. 10, n. 1, p. 139–167, 2022.

ANELLI, P.; HAIDUKOWSKI, M.; EPIFANI, F.; CIMMARUSTI, M. T.; MORETTI, A.; LOGRIECO, A.; SUSCA, A. Fungal mycobiota and mycotoxin risk for traditional artisan Italian cave cheese. *Food Microbiology*, v. 78, p. 62–72, 2019.

ASHTEKAR, N.; RAJESHKUMAR, K. C.; YILMAZ, N.; VISAGIE, C. M. A new *Penicillium* section *Citrina* species and series from India. *Mycological Progress*, v. 21, 42, 2022.

BARBOSA, R. N.; DOS SANTOS, J. E. F.; BEZERRA, J. D. P.; ISTELE, Ł.; HOUBRAKEN, J.; OLIVEIRA, N. T.; DE SOUZA-MOTTA, C. M. Brazilian Atlantic Forest and Pampa biomes in the spotlight: an overview of *Aspergillus*, *Penicillium*, and *Talaromyces* (Eurotiales) species and the description of *Penicillium nordes-tinense* sp. nov. *Acta Botanica Brasilica*, v. 36, p. e2021abb0390, 2022.

BARBOSA, R. N.; BEZERRA, J. D. P.; SANTOS, A. C. S.; MELO, R. F. R.; HOUBRAKEN, J.; OLIVEIRA, N. T.; DE SOUZA-MOTTA, C. M. Brazilian tropical dry forest (Caatinga) in the spotlight: an overview of species of *Aspergillus*, *Penicillium* and *Talaromyces* (Eurotiales) and the description of *P. vascosobrinhou* sp. nov. *Acta Botanica Brasilica*, v. 34, n. 2, p. 409–429, 2020.

BARBOSA, R. N.; BEZERRA, J. D. P.; DE SOUZA-MOTTA, C. M.; FRISVAD, J. C.; SAMSON, R. A.; OLIVEIRA, N. T.; HOUBRAKEN, J. New *Penicillium* and *Talaromyces* species from honey, pollen and nests of stingless bees. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 111, n. 10, p. 1883–1912, 2018.

BARTON, H. A. Introduction to cave microbiology: a review for the non-specialist. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 68, p. 43–64, 2006.

BELYAGOUBI, L.; BELYAGOUBI-BENHAMMOU, N.; JURADO, V.; DUPONT, J.; LACOSTE, S.; DJEBBAH, F.; OUNADJELA, F.; BENAÏSSA, S.; HABI, S.; ABDELOUAHID, D.; SAIZ-JIMENEZ, C. Antimicrobial activities of culturable microorganisms (actinomycetes and fungi) isolated from Chaabe Cave, Algeria. *International Journal of Speleology*, v. 47, n. 2, p. 189–199, 2018.

BEZERRA, J. D. P.; SANDOVAL-DENIS, M.; PAIVA, L. M.; SILVA, G. A.; GROENEWALD, J. Z.; SOUZA-MOTTA, C. M.; CROUS, P. W. New endophytic *Toxicocladosporium* species from cacti in Brazil, and description of *Neocladosporium* gen. nov. *IMA Fungus*, v. 8, n. 1, p. 77–97, 2017.

BRITO, F. E. G. *Produção e ação antimicrobiana da quitosana proveniente da biomassa de fungos filamentosos isolados de solos de Roraima*. 2015. 66 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2015.

CARVALHO, J. L. V. R.; LIMA, J. M. S.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; BEZERRA, J. D. P.; SOUZA-MOTTA, C. M. Ticket to ride: fungi from bat ectoparasites in a tropical cave and the description of two new species. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 53, n. 4, p. 2077–2091, 2022.

COTON, E.; COTON, M.; HYMERY, N.; MOUNIER, J.; JANY, J. *Penicillium roqueforti*: an overview of its genetics, physiology, metabolism and biotechnological applications. *Fungal Biology Reviews*, v. 34, n. 2, p. 59–73, 2020.

CROUS, P. W.; VERKLEY, G. J. M.; GROENEWALD, J. Z.; SAMSON R. A. *Fungal biodiversity*. Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, 2009. 250p.

CUNHA, A. O. B.; BEZERRA, J. D. P.; OLIVEIRA, T. G. L.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; MACHADO, A. R.; SOUZA-MOTTA, C. M. Living in the dark: Bat caves as hotspots of fungal diversity. *PLOS ONE*, v. 15, n. 12, p. e0243494, 2020.

DA COSTA, F. L. B. *Identificação de fungos isolados de cavidades naturais subterrâneas do Parque Estadual do Sumidouro*. 2015. 123 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Microbiologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DE HOOG, G. S.; GUARRO, J.; GENÉ, J.; AHMED, S.; AL-HATMI, A. M. S.; FIGUERAS, M. J.; VITALE, R.G. *Atlas of clinical fungi*: the ultimate bench tool for diagnostics. 4. ed. Hilversum: Westerdijk Institute, 2020.

DE OLIVEIRA, R. V. M.; CORRÊA-MOREIRA, D.; MENDES, T. V.; DA COSTA, G. L.; VIEIRA, R. M.; BUCHELE, C. M. N.; LINS, R. S.; FERREIRA, A. B. T. B. C.; VEIRA, D. B.; PEDROSO, R. S. A.; DE FARIA, V. T. D. P.; OLIVEIRA, M. M. E. First report of fungal meningoencephalitis by *Penicillium chrysogenum* in Brazil. *International Journal of Infectious Diseases*, v. 126, p. 94–97, 2023.

DE PAULA, C. C. P.; MONTOYA, Q. V.; MEIRELLES, L. A.; FARINAS, C. S.; RODRIGUES, A.; SELEGHIM, M. H. R. High cellulolytic activities in filamentous fungi isolated from an extreme oligotrophic subterranean environment (Catão cave) in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, n. 3, e20180583, 2019.

DE SOUZA, S. C. *Diversidade de espécies dos gêneros Aspergillus, Penicillium e Talaromyces isolados do solo de canga do Quadrilátero Ferrífero*. 2018. 140 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

DIAO, Y.; CHEN, Q.; JIANG, X.; HOUBRAKEN, J.; BARBOSA, R. N.; CAI, L.; WU, W. *Penicillium* section *Lanatadivaricata* from acidic soil. *Cladistics*, v. 35, n. 5, p. 514–549, 2018.

FAGERIA, L.; PAREEK, V.; DILIP, R. V.; BHARGAVA, A.; PASHA, S. S.; LASKAR, I. R.; SAINI, H.; DASH, S.; CHOWDHURY, R.; PANWAR, J. Biosynthesized protein-capped silver nanoparticles induce ROS-dependent proapoptotic signals and prosurvival autophagy in cancer cells. *ACS Omega*, v. 2, n. 4, p. 1489–1504, 2017.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P.; YANEGA, D. Ecology of bat guano arthropod communities in a Brazilian dry cave. *Ecotropica*, v. 6, n. 2, p. 105–116, 2000a.

FERREIRA, R. L.; NONAKA, É.; ROSA, C. A. Riqueza e abundância de fungos associados ao guano de morcegos hematófagos na Gruta da Lavoura (Matozinhos, MG). *O Carste*, v. 12, n. 1, p. 46–52, 2000b.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. *Jardim Botânico do Rio de Janeiro*. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 23 jan. 2023.

FREITAS, S. T. O.; DIAS, P. A.; MOMOLI, R. S. Potencial do turismo espeleológico na região de Vila Propício (GO). In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. *Anais eletrônicos [...]* Campinas: SBE, 2019. p. 485-491. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_485-491.pdf. Acesso em: 11 jul. 2022.

FRISVAD, J. C. *Penicillium: Penicillium/Penicillia* in food production. In: BATT, C.A.; TORTORELLO, M.L. *Encyclopedia of food microbiology*. Elsevier, 2014. v. 3, cap. 1, p. 14-18.

GONÇALVES, M. F. M.; SANTOS, L.; SILVA, B. M. V.; ABREU, A. C.; VICENTE, T. F. L.; ESTEVES, A. C.; ALVES, A. Biodiversity of *Penicillium* species from marine environments in Portugal and description of *Penicillium lusitanum* sp. nov., a novel species isolated from sea water. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 69, n. 10, p. 3014–3021, 2019.

GUERRA, L. C. C.; LEMES, C. G. C.; MOREIRA, L. M. Potencial biotecnológico de bactérias cultiváveis obtidas a partir da Gruta Matimiano II, Parque Estadual do Ibitipoca - MG. *Revista Brasileira de Espeleologia*, p. 65-89, 2022.

- GUEVARA-SUAREZ, M.; GARCÍA, D.; CANO-LIRA, J. F.; GUARRO, J.; GENÉ J. Species diversity in *Penicillium* and *Talaromyces* from herbivore dung, and the proposal of two new genera of *penicillium*-like fungi in *Aspergillaceae*. *Fungal Systematics and Evolution*, v. 5, n. 1. 39–75, 2019.
- GUPTA V. K.; RODRIGUEZ-COUTO, S. *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Penicillium system properties and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2018. 298p.
- HOUBRAKEN, J. A. M. P.; FRISVAD, J. C.; SAMSON, R. A. Taxonomy of *Penicillium citrinum* and related species. *Fungal Diversity*, v. 44, n. 1, p. 117–133, 2010.
- HOUBRAKEN, J.; FRISVAD, J. C.; SAMSON, R. A. Taxonomy of *Penicillium* section *Citrina*. *Studies in Mycology*, v. 70, p. 53–138, 2011.
- HSI, H. Y.; WANG, S. W.; CHENG, C. H.; PANG, K. L.; LEU, J. Y.; CHANG, S. H.; LEE, Y. T.; KUO, Y. H.; HUANG, C. Y.; LEE, T. H. Chemical constituents and anti-angiogenic principles from a marine algiculous *Penicillium sumatraense* SC29. *Molecules*, v. 27, n. 24, p. 8940, 2022.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS (CECAV). *Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro de 2022*. ICMBio-CECAV, 2022a. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleologico-brasileiro/cecav-anuario-estatistico-espeleologico-2022.pdf>>. Acesso em: ago. de 2023.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS (CECAV). *Orientações ao uso turístico sustentável da caverna dos Crotes Felipe Guerra-RN*. ICMBio-CECAV, 2022b.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS (CECAV). *Plano de Manejo Espeleológico da Furna Nova, Baraúna/RN - Parque Nacional da Furna Feia*. ICMBio-CECAV, 2023.
- KATOH, K.; ROZEWICKI, J.; YAMADA, K. D. MAFFT online service: multiple sequence alignment, interactive sequence choice and visualization. *Briefings in Bioinformatics*, v. 20, n. 4, p. 1160–1166, 2017.
- KHANDAVILLI, R.; MEENA, R.; SHENOY, B. D. Fungal phylogenetic diversity in estuarine sediments of Gautami Godavari River, Andhra Pradesh, India. *Current Research in Environmental & Applied Mycology*, v. 6, n. 4, p. 268–276, 2016.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do cerrado brasileiro. *Megadiversidade*, v. 1, p. 147–155, 2005.
- KWAŚNA, H.; NIRENBERG, H. I. Delimitation of *Penicillium virgatum* sp. nov. and *P. daleae* on the basis of morphological and molecular characters. *Mycological Research*, v. 109, n. 9, p. 974–982, 2005.

LAI, L.-H.; ZONG, M.-H.; HUANG, Z.; NI, Z.-F.; XU, P.; LOU, W.-Y. Purification, structural elucidation and biological activities of exopolysaccharide produced by the endophytic *Penicillium javanicum* from *Millettia speciosa* Champ. *Journal of Biotechnology*, v. 362, p. 54–62, 2023.

LATZ, M. A. C.; JENSEN, B.; COLLINGE, D. B.; JØRGENSEN, H. J. L. Identification of two endophytic fungi that control *Septoria tritici* blotch in the field, using a structured screening approach. *Biological Control*, v. 141, p. 104128, 2020.

LI, B.-C.; LV, L. X.; HUANG, L. L.; ZHOU, J. T.; HUANG, X. S.; LI, J.; YANG, R. Y.; XU, W. F. Cycloaspeptide H, a cyclopentapeptide from the endophytic fungus *Penicillium virgatum*. *Natural Product Research*, p. 1–7, 2022.

LIANG, Z.-Y.; SHEN, N.-X.; ZHOU, X.-J.; ZHENG, Y.-Y.; CHEN, M.; WANG, C.-Y. Bioactive indole diterpenoids and polyketides from the marine-derived fungus *Penicillium javanicum*. *Chemistry of Natural Compounds*, v. 56, n. 2, p. 379–382, 2020.

LIANG, Z.-Y.; SHEN, N. X.; ZHENG, Y. Y.; WU, J. T.; MIAO, L.; FU, X. M.; CHEN, M.; WANG, C. Y. Two new unsaturated fatty acids from the mangrove rhizosphere soil-derived fungus *Penicillium javanicum* HK1-22. *Bioorganic Chemistry*, v. 93, p. 103331, 2019.

LIU, Z.-G. *et al.* Chemical diversity from the Tibetan Plateau fungi *Penicillium kongii* and *P. brasilianum*. *Mycology*, v. 9, n. 1, p. 10–19, 2017.

LOBATO, R. C.; VARGAS, V. DE S.; SILVEIRA, É. DA S. Sazonalidade e prevalência de fungos anemófilos em ambiente hospitalar no Sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba*, v. 11, n. 2, p. 21–28, 2009.

LOBO, H. A. S.; BOGGIANI, P. C. Cavernas como patrimônio geológico. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 70, p. 190–199, 2013.

MA, Y.; CHANG, Z.; ZHAO, J.; ZHOU, M. Antifungal activity of *Penicillium striatisporum* Pst10 and its biocontrol effect on *Phytophthora* root rot of chilli pepper. *Biological Control*, v. 44, n. 1, p. 24–31, 2008.

MAAMOUN, H. S.; RABIE, G. H.; SHAKER, I.; ALAIDAROOS, A. B.; EL-SAYED, A. S. A. Biochemical Properties of Tyrosinase from *Aspergillus terreus* and *Penicillium copticola*; Undecanoic acid from *Aspergillus flavus*, an endophyte of *Moringa oleifera*, is a novel potent tyrosinase inhibitor. *Molecules*, v. 26, n. 5, p. 1309, 2021.

MORALES-OYERVIDES, L.; RUIZ-SÁNCHEZ, J. P.; OLIVEIRA, J. C.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; MÉNDEZ-ZAVALA, A.; GIUFFRIDA, D.; DUFOSSÉ, L.; MONTAÑEZ, J. Biotechnological approaches for the production of

- natural colorants by *Talaromyces/Penicillium*: A review. *Biotechnology Advances*, v. 43, p. 107601, 2020.
- NDAGIJIMANA, M.; CHAVES-LÓPEZ, C.; CORSETTI, A.; TOFALO, R.; SERGI, M.; PAPARELLA, A.; GUERZONI, M. E.; SUZZI, G. Growth and metabolites production by *Penicillium brevicompactum* in yoghurt. *International Journal of Food Microbiology*, v. 127, n. 3, p. 276–283, 2008.
- NIEVES-RIVERA, A. M. Mycological survey of Río Camuy Caves Park, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 65, p. 23–28, 2003.
- NOVÁKOVÁ, A. Microscopic fungi isolated from the Domica Cave system (Slovak Karst National Park, Slovakia). A review. *International Journal of Speleology*, v. 38, n. 1, p. 71–82, 2009.
- OGÓREK, R.; LEJMAN, A.; MATKOWSKI, K. Influence of the external environment on airborne fungi isolated from a cave. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 23, p. 435–440, 2014.
- PARK, M. S.; LEE, S.; OH, S. Y.; CHO, G. Y.; LIM, Y. W. Diversity and enzyme activity of *Penicillium* species associated with macroalgae in Jeju Island. *Journal of Microbiology*, v. 54, n. 10, p. 646–654, 2016.
- PARK, M. S.; OH, S. Y.; FONG, J. J.; HOUBRAKEN, J.; LIM, Y. W. The diversity and ecological roles of *Penicillium* in intertidal zones. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, 2019.
- PEAY, K. G.; KENNEDY, P. G.; TALBOT, J. M. Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. *Nature Reviews Microbiology*, v. 14, n. 7, p. 434–447, 2016.
- PEDRO, E. G.; BONONI, V. L. R. Cave fungi of the karst region of the State Touristic Park of the Upper Ribeira Valley (PETAR) in the state of São Paulo in Brazil. *Focus*, v. 1, p. 65–78, 2007.
- PEREIRA, M. L. S.; CARVALHO, J. L. V. R.; LIMA, J. M. S.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; BEZERRA, J. D. P.; SOUZA-MOTTA, C. M. Richness of *Cladosporium* in a tropical bat cave with the description of two new species. *Mycological Progress*, v. 21, n. 1, p. 345–357, 2022.
- PUNJA, Z. K. The diverse mycoflora present on dried cannabis (*Cannabis sativa* L., marijuana) inflorescences in commercial production. *Canadian Journal of Plant Pathology*, v. 43, n. 1, p. 88–100, 2020.
- REGUEIRA, T. B.; KILDEGAARD, K. R.; HANSEN, B. G.; MORTENSEN, U. H.; HERTWECK, C.; NIELSEN, J. Molecular Basis for Mycophenolic Acid Biosynthesis in *Penicillium brevicompactum*. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 77, n. 9, p. 3035–3043, 2011.
- SAMSON, R. A.; HOUBRAKEN, J. *Phylogenetic and taxonomic studies on the genera Penicillium and Talaromyces*. Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, 2011. 198p.
- SAMSON, R. A.; HOUBRAKEN, J.; THRANE, U.; FRISVAD, J. C.; ANDERSEN, B. *Food and indoor fungi*. Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, Cop, 2010. 390p.

- SEIFERT, K. A.; MORGAN-JONES, G.; GAMS, W.; KENDRICK, B. *The genera of hyphomycetes*. Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, 2011. 997p.
- SMIRI, M.; KHEIREDDINE, A.; HAMMAMI, R.; ROUISSI, M.; ESPESO, E. A.; SADFI-ZOUAOUI, N. An assessment of the air quality in apple warehouses: new records of *Aspergillus europaeus*, *Aspergillus pulverulentus*, *Penicillium allii* and *Penicillium sumatraense* as decay agents. *Archives of Microbiology*, v. 203, n. 10, p. 5975–5992, 2021.
- TAMURA, K.; STECHER, G.; KUMAR, S. MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. *Molecular Biology and Evolution*, v. 38, n. 7, p. 3022–3027, 2021.
- TAYLOR, E. L. S.; FERREIRA, R. L.; CARDOSO, P. G.; STOIANOFF, M. A. R. Cave entrance dependent spore dispersion of filamentous fungi isolated from various sediments of iron ore cave in Brazil: a colloquy on human threats while caving. *Ambient Science*, v. 1, n. 1, p. 16–28, 2014.
- TAYLOR, E. L. S.; STOIANOFF, M. A. R.; FERREIRA, R. L. Mycological study for a management plan of a neotropical show cave (Brazil). *International Journal of Speleology*, v. 42, n. 3, p. 267–277, 2013.
- TRANCHIMAND, S.; ERTEL, G.; GAYDOU, V.; GAUDIN, C.; TRON, T.; IACAZIO, G. Biochemical and molecular characterization of a quercetinase from *Penicillium olsonii*. *Biochimie*, v. 90, n. 5, p. 781–789, 2008.
- TRANCHIMAND, S.; TRON, T.; GAUDIN, C.; IACAZIO, G. Evaluation of phenolics and sugars as inducers of quercetinase activity in *Penicillium olsonii*. *FEMS Microbiology Letters*, v. 253, n. 2, p. 289–294, 2005.
- VANDERWOLF, K.; MALLOCH, D.; MCALPINE, D. F.; FORBES, G. J. A world review of fungi, yeasts, and slime molds in caves. *International Journal of Speleology*, v. 42, n. 1, p. 77–96, 2013.
- VICENTINI, A. P.; PASSOS, A. N.; SILVA, D. F.; BARRETO, L. C.; ASSIS, C. M.; FREITAS, R. S. Histoplasmosse: um risco ocupacional entre pesquisadores que realizam trabalho de campo? *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 71, n. 4, p. 747–752, 2012.
- VISAGIE, C. M.; SEIFERT, K. A.; HOUBRAKEN, J.; SAMSON, R. A.; JACOBS, K. A phylogenetic revision of *Penicillium* sect. *Exilicaulis*, including nine new species from fynbos in South Africa. *IMA Fungus*, v. 7, n. 1, p. 75–117, 2016.
- WAGNER, F.; KUSSEROW, H.; SCHÄFER, W. Cloning and targeted disruption of two polygalacturonase genes in *Penicillium olsonii*. *FEMS Microbiology Letters*, v. 186, n. 2, p. 293–299, 2000.
- WANG, B.; WANG, L. *Penicillium kongii*, a new terverticillate species isolated from plant leaves in China. *Mycologia*, v. 105, n. 6, p. 1547–1554, 2013.
- WHITE, T. J.; BRUNS, T.; TAYLOR, J. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: INNIS, M. A.; GELFAND, D. H.; SNINSKY, J. J.; WHITE, J. W. *A Guide to Molecular Methods and 76 Applications*. Academic Press, 1990. cap. 38, p. 315–322.

YIN, G.-P.; GONG, M.; XUE, G.-M.; GONG, T.; CAO, X.; WANG, W.; HU, C.-H. Penispidins A–C, Aromatic sesquiterpenoids from *Penicillium virgatum* and their inhibitory effects on hepatic lipid accumulation. *Journal of Natural Products*, v. 84, n. 10, p. 2623–2629, 2021.

ZENG, Y.; WANG, H.; KAMDEM, R. S. T.; ORFALI, R. S.; DAI, H.; MAKHLOUFI, G.; JANIYAK, C.; LIU, Z.; PROKSCHB, P. A new cyclohexapeptide, penitropeptide and a new polyketide, penitropone from the endophytic fungus *Penicillium tropicum*. *Tetrahedron Letters*, v. 57, n. 27-28, p. 2998–3001, 2016.

ZHANG, Z. F.; LIU, F.; ZHOU, X.; LIU, X. Z.; LIU, S. J.; CAI, L. Culturable mycobiota from Karst caves in China, with descriptions of 20 new species. *Persoonia*, v. 39, n. 1, p. 1–31, 2017.

ZHANG, Z.-F.; ZHAO, P.; CAI, L. Origin of cave fungi. *Frontiers in Microbiology*, v. 9, 1407, 2018.

ZHANG, Z.-F.; ZHOU, S.-Y.; EURWILAICHITR, L.; INGSRISWANG, S.; RAZA, M.; CHEN, Q.; ZHAO, P.; LIU, F.; CAI, L. Culturable mycobiota from Karst caves in China II, with descriptions of 33 new species. *Fungal Diversity*, v. 106, p. 29-136, 2021.

ZHELYAZKOVA, V.; HUBANCHEVA, A.; RADOSLAVOV, G. A.; TOSHKOVA, N. Did you wash your caving suit? Cavers' role in the potential spread of *Pseudogymnoascus destructans*, the causative agent of White-Nose Disease. *International Journal of Speleology*, v. 49, n. 2, p. 149–159, 2020.

VRBEsp

Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

