GUIA DE BOAS PRÁTICAS PARA O MONITORAMENTO ESPELEOLÓGICO DE CAVERNAS FERRÍFERAS







ORGANIZADORES ORGANIZERS

Matheus Henrique Simões, Robson de Almeida Zampaulo e/and Iuri Viana Brandi

GUIDE TO BEST PRACTICES FOR SPELEOLOGICAL MONITORING OF FERRIFEROUS CAVES

VALE

GUIA DE
BOAS PRÁTICAS

PARA O MONITORAMENTO ESPELEOLÓGICO DE CAVERNAS FERRÍFERAS

ORGANIZADORES

Matheus Henrique Simões, Robson de Almeida Zampaulo e Iuri Viana Brandi

EDITORA RUPESTRE

Belo Horizonte • Novembro 2025

GUIDE TO
BEST PRACTICES

FOR SPELEOLOGICAL MONITORING OF FERRIFEROUS CAVES

ORGANIZERS

Matheus Henrique Simões, Robson de Almeida Zampaulo and Iuri Viana Brandi

EDITORA RUPESTRE

Belo Horizonte • November 2025



Caverna/Cave PDI_0018
Foto/Photo: Ataliba Coelho



Prefácio

Esta obra é um generoso compartilhamento de aprendizado, criatividade, adaptações metodológicas e dos acertos (e erros!) acumulados por diversas equipes ao longo dos anos. O monitoramento em cavernas ferríferas exige inventar e reinventar procedimentos, enfrentando a complexidade e as particularidades do ambiente, reconhecendo que o próprio monitoramento pode gerar impactos, por vezes relevantes. É nesse ponto que esta obra se destaca: organiza cuidadosamente o conhecimento técnico e de campo de quem já superou esses desafios e reúne as melhores práticas atuais, guiando o caminho para monitoramentos futuros. A publicação do Decreto Federal nº 6.640/2008 impulsionou a espeleologia aplicada, consolidando metodologias para cavernas sujeitas à supressão e para aquelas destinadas à preservação por compensação espeleológica. Contudo, um conjunto importante de cavernas permaneceu à margem: aquelas sem previsão de impactos irreversíveis, mas que coexistem com empreendimentos no seu entorno. Para muitas dessas cavernas, o monitoramento somado às medidas de controle e mitigação garantem sua integridade e possibilita avaliar o desempenho da gestão ambiental e a necessidade de medidas corretivas. Em outra frente, esta obra também contribui para pesquisas sobre mudanças ambientais e climáticas, além da avaliação de impactos do espeleoturismo. Monitorar é, em essência, compreender a dinâmica subterrânea, antecipar riscos, reduzir incertezas e fortalecer a tomada de decisão baseada em evidências.

Boa leitura!

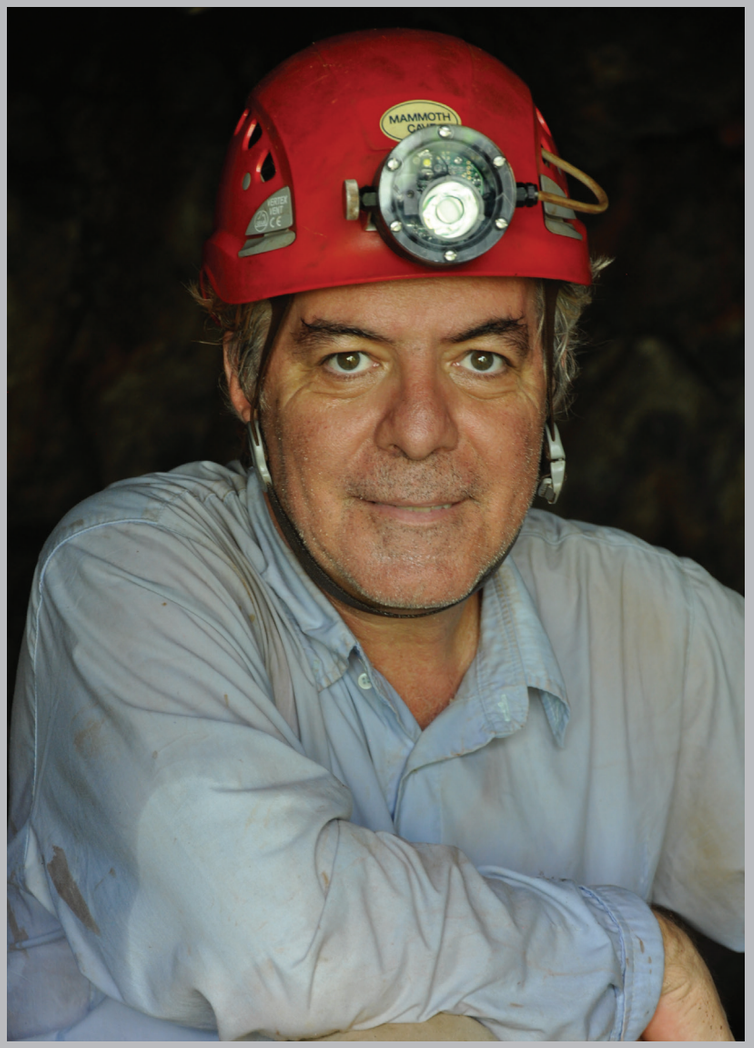
Isabel Pires Mascarenhas Ribeiro de Oliveira
Coordenadora de Análise Técnica Central Metropolitana
Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) de Minas Gerais

Preface

This work is a generous and comprehensive sharing of learning, creativity, methodological adaptations, and the successes (and failures!) accumulated by various teams over the years. Monitoring in ferriferous caves requires inventing and reinventing procedures, facing the complexity and particularities of the environment, while recognizing that the monitoring itself can generate impacts, sometimes significant. It is at this point that this work stands out: it carefully organizes the technical and field knowledge of those who have already overcome these challenges and brings together current best practices, guiding the way for future monitoring. The publication of Federal Decree nº. 6,640/2008 promoted applied speleology, consolidating methodologies for caves subject to suppression and for those intended for preservation through speleological compensation. However, an important set of caves remained on the margins: those without a forecast of irreversible impacts, but which coexist with developments in their surroundings. For many of these caves, monitoring combined with control and mitigation measures ensures their integrity and enables the assessment ofthe performance of environmental management and the need for corrective measures. On another front, this work also contributes to research on environmental and climate change, as well as the assessment of the impacts of speleotourism. Monitoring is, in essence, understanding underground dynamics, anticipating risks, reducing uncertainties, and strengthening evidence-based decision-making.

Happy reading!

Isabel Pires Mascarenhas Ribeiro de Oliveira
Coordenadora de Análise Técnica Central Metropolitana
Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) de Minas Gerais



Luís Beethoven Piló
Foto/Photo: Rafael Scherer

In memoriam a Luís Beethoven Piló

Conheci o Luís Beethoven Piló no início de 2005, quando fizemos nosso primeiro trabalho de espeleologia juntos. O cenário era a Serra dos Carajás (Pará), e estávamos iniciando os estudos em cavernas ferríferas na região. Tudo era novidade: as cavernas, a paisagem, o contexto – tudo diferente de qualquer coisa que já tínhamos visto. Um novo desafio se abria diante de nós, e da espeleologia como um todo.

Já nesse primeiro campo, ficou evidente que eu estava trabalhando com alguém especial. Um cara inteligente, cativante e, na essência, profundamente curioso. Muito curioso. Essa curiosidade o movia: instigava-o a questionar, aprender, buscar respostas. E não guardava esse conhecimento só para si, gostava imensamente de compartilhá-lo com as pessoas à sua volta. De maneira carismática e generosa, envolvia a todos durante suas explanações, irradiando sua paixão pelas cavernas e pelo carste. Ir com ele a uma caverna era sempre uma experiência enriquecedora. Beethoven formou muita gente, inspirou inúmeros admiradores.

Tive o privilégio de acompanhar parte de sua trajetória de perto, não apenas como companheira, mas também como colaboradora em vários projetos. Era especial poder trabalhar com alguém tão perspicaz e dedicado ao que fazia. Seus documentos eram sempre muito bem elaborados: claros, objetivos e de alto nível técnico e comunicativo. Suas aulas e cursos refletiam a mesma excelência: didáticos, envolventes e generosos no conteúdo. Ele sabia como ninguém agregar, traçar uma síntese precisa da situação, propor soluções e apontar caminhos com clareza.

Suas atividades espeleológicas não se limitavam aos projetos profissionais. Mais ao final de sua trajetória, e movido por uma sede contínua de aprender, ele decidiu aprofundar ainda mais seus estudos. Encantou-se pelos morcegos e passou a pesquisar o guano nas cavernas de Carajás, mais uma demonstração de sua paixão pelo conhecimento e pela espeleologia.

Luís Beethoven Piló é uma referência na espeleologia e nos estudos do carste no Brasil. Sua contribuição técnica e científica para o desenvolvimento e a conservação do patrimônio espeleológico do país foi notável e marcante. Sua ausência deixa um vazio imenso, mas seu legado permanece vivo na espeleologia, e em cada olhar curioso que ele ajudou a despertar. Entre aqueles que tiveram a oportunidade de conhecê-lo, ficam as boas lembranças, a admiração e o carinho que ele naturalmente inspirava.

Renata de Andrade

In memoriam of Luís Beethoven Piló

I met Luís Beethoven Piló in early 2005, when we did our first speleological project together. We were beginning to study ferriferous caves in the Serra dos Carajás region (Pará). Everything was new: the caves, the landscape, the context — everything different from anything we had seen before. A new challenge lay before us, and for speleology as a whole.

Even during this first field expedition, it became clear that I was working with someone special. An intelligent, engaging, and, at heart, deeply curious man. Very curious. This curiosity drove him: it stimulated him to question, learn, and seek answers. And he didn't keep this knowledge to himself; he immensely enjoyed sharing his knowledge with those around him. Charismatic and generous, he engaged everyone during his explanations, radiating his passion for caves and karst. Going to a cave with him was always an enriching experience. Beethoven educated many people and inspired countless admirers.

I had the privilege of following part of his career closely, not only as a colleague but also as a collaborator on several projects. It was special to be able to work with someone so insightful and dedicated to what they did. His documents were always very well-prepared: clear, objective, and of a high technical and communicative level. His classes and courses reflected the same excellence: didactic, engaging, and generous in content. He could, like no one else, precisely synthesize the situation, propose solutions, and clearly point the way forward.

His speleological activities weren't limited to professional projects. Toward the end of his career, driven by a constant thirst for learning, he decided to further his studies. He became fascinated by bats and began researching guano in the caves of Carajás, further demonstrating his passion for knowledge and speleology.

Luís Beethoven Piló remains a leading figure in speleology and karst studies in Brazil. His technical and scientific contributions to the development and conservation of the country's speleological heritage are notable and remarkable. His absence leaves a huge void, but his legacy lives on in speleology and in every curious eye he helped awaken. Among those who had the opportunity to meet him, fond memories remain, along with the admiration and affection he naturally inspired.

Renata de Andrade

ORGANIZADORES ORGANIZERS
Matheus Henrique Simões
Robson de Almeida Zampaulo
Iuri Viana Brandi

DESIGN DESIGN
Flávia Guimarães

ICONOGRAFIA ICONOGRAPHY
Misael A. Oliveira-Neto

FOTOS CAPA COVER PHOTOS
André Bernardes Machado

REVISÃO ORTOGRÁFICA ORTHOGRAPHIC REVIEW
Edda Cabral Martins da Costa

REVISÃO NORMAS ABNT STANDARDS REVIEW ABNT
Rachel Bragança de Carvalho Mota – CRB-6/2838

TRADUÇÃO TRANSLATION
Erik Russell Wild

Esta obra foi produzida com recursos de compensação espeleológica estabelecida na Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação (LP+LI+LO) nº 012/2020 (Parecer nº 0233740/2020), do Projeto Ampliação da Mina de Fazendão, Processo Administrativo nº 00312/1996/045/2015 e em atendimento a Condicionante nº 7 "***Protocolar comprovante de publicação do livro "Guia de Boas Práticas no Monitoramento Espeleológico para cavernas ferríferas***" do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica (TCCE) estabelecido entre a Vale e a Superintendência de Projetos Prioritários (SUPPRI) da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais (SEMAD).

This work was produced using speleological compensation resources established in the Licença Prévia, Licença de Instalação and Licença de Operação (LP+LI+LO; preliminary, installation, and operating licenses, respectively) No. 012/2020 (Opinion No. 0233740/2020), of Projeto Ampliação da Mina de Fazendão, Administrative Process No. 00312/1996/045/2015 and in compliance with Condition No. 7 "***Protocolar comprovante de publicação do livro "Guia de Boas Práticas no Monitoramento Espeleológico para cavernas ferríferas***" of the Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica (TCCE) established between Vale and the Superintendência de Projetos Prioritários (SUPPRI) of the Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável of the state of Minas Gerais (SEMAD).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Guia de boas práticas para o monitoramento
espeleológico de cavernas ferríferas /
organizadores Matheus H Simões, Robson de A.
Zampaulo, Iuri V. Brandi ; [tradução Erik R.
Wild]. -- Belo Horizonte, MG : Rupestre, 2025.

Título original: Guide to best practices for
speleological monitoring of ferriferous caves.
ISBN 978-65-87674-15-5

1. Cavernas - Brasil 2. Espeleologia
3. Monitoramento ambiental I. Simões, Matheus H.
II. Zampaulo, Robson de A. III. Brandi, Iuri V.

25-315549.0 CDD-551.4470981

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Cavernas : Geomorfologia 551.4470981

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Autores Autors

Adam Barros Fernandes
Themag Engenharia e Gerenciamento
adambarrosgeo@gmail.com

Allan Silas Calux
Carstográfica Karst Applied Research Centre / Cave Exploration Society South America
ascalux@gmail.com

Alvaro Costa Figueiredo
CSN – Companhia Siderúrgica Nacional
alvaro.costaf@gmail.com

André Bernardes Machado
Observatório Espeleológico e Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas
cheabm@gmail.com

Antônio Carlos Bertachini
MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente
berta@mdgeo.com.br

Bruno Fernandes de Aguiar
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
bruno.aguiar@vale.com

Daniela Gonçalves Rodrigues da Silva
Gerência de Estudos Técnicos de Longo Prazo, Vale S.A.
daniela.silva@vale.com

Danielle Pedrosa Oliveira
Consultora autônoma
danipoliveir@yahoo.com.br

Eloá Carolina Vilela de Oliveira
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
eloa.oliveira@vale.com

Felipe Costa
MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente
fcosta@hydrogeoscience.com.br

Fernando José Gallo Frigo
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
fernando.frigo@vale.com

Fernando Santos Seabra Cardoso
Aura Minerals
fernando.cardoso@auraminerals.com

Georgete Macedo Dutra
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
georgete.dutra@vale.com

Gisele Lopes Nunes
Instituto Tecnológico Vale – ITV
gisele.nunes@itv.org

Giuliana Appel
Instituto Tecnológico Vale – ITV
giu.appel@gmail.com

Guilherme Oliveira
Instituto Tecnológico Vale – ITV
guilherme.oliveira@itv.org

Gustavo Pisa Perroni
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
gustavo.perroni@vale.com

Iuri Viana Brandi
Gerência de Estudos Técnicos de Longo Prazo e Espeleologia, Vale S.A.
iuri.brandi@vale.com

Ivia Lemos Barroso
CLAM
ivialemos@gmail.com

Juliana Barbosa Timo
Spelayon Consultoria
juliana.timo@spelayonconsultoria.com.br

Juliana Macaron Longo Rodrigues
Ativo Ambiental
juliana.macaron@ativoambiental.com.br

Julio Almeida Moreira
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
julio.moreira4@vale.com

Laís Furtado Oliveira
Ativo Ambiental
lais.furtado@ativoambiental.com.br

Leandro Alves Caldeira Luzzi
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
leandro.luzzi@vale.com

Leonardo Carreira Trevelin
Instituto Tecnológico Vale – ITV
leonardo.trevelin@itv.org

Lívia Dorneles Audino
Consultora Autônoma
livia.audino@gmail.com

Luana Camile Silva Silva
Universidade Federal do Pará – UFPA
luana.silva@ig.ufpa.br

Lucas Padoan de Sá Godinho
MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente
lucaspsgodinho@gmail.com

Luiz Felipe Lopes
Spelayon Consultoria
luizfelipe.lopez@spelayonconsultoria.com.br

Luiz Felipe Mendonça de Amorim
Sismogeo Engenharia
luiz@sismogeo.com

Marcus Paulo de Oliveira
BioEspeleo Consultoria Ambiental
marcus@bioespeleo.com.br

Mariana Barbosa Timo
Spelayon Consultoria
mariana.timo@spelayonconsultoria.com.br

Mariane Soares Ribeiro Pereira
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
mariane.ribeiro@vale.com

Matheus Henrique Simões
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
matheus.simoes@vale.com

Mauri Lopes Ferreira Junior
MLF Geomecanica
mauri.junior@mlfgeomecanica.com.br

Mauricio Nicolau de Assis Bertachini
MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente
mauricio@mdgeo.com.br

Rafael Salvador Neves Coelho
Spelayon Consultoria
rafael.salvador@spelayonconsultoria.com.br

Ramon Nunes de Araújo
Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, Vale S.A.
ramon.araujo@vale.com

Robson de Almeida Zampaulo
RZampaulo – Espeleologia e Consultoria Ambiental / Grupo de Estudos Ambientais da Serra do Mar (GESMAR)
rzampaulo@yahoo.com.br

Rodrigo de Paula Hamzi
BVP Geotecnia e Hidrotecnia
rodrigo.hamzi@gmail.com

Ronnie Cley de Oliveira Alves
Instituto Tecnológico Vale – ITV
ronnie.alves@itv.org

Santelmo Selmo de Vasconcelos Júnior
Instituto Tecnológico Vale – ITV
santelmo.vasconcelos@itv.org

Sebastião Maximiano Corrêa Genelhú
Universidade Federal de Lavras – UFLA
sebastiaogenelhum@gmail.com

Thadeu Pietrobon
SpeleoData Science & Consultancy
thadeu.pietrobon@speleodata.com

Thayse Cristine Melo Benathar
Instituto Tecnológico Vale – ITV
thaysebenathar@yahoo.com.br

Thiago Ferreira Lima
Brandt Meio Ambiente
tlima@brandt.com.br

Tomás Romualdo Corrêa
TC Geologia
tomasrcorrea@gmail.com

Valéria da Cunha Tavares
Instituto Tecnológico Vale – ITV
valeria.tavares@itv.org

Vitor Cirilo Araujo Santos
Instituto Tecnológico Vale – ITV
vitor.cirilo.santos@itv.org

Xavier Prous
Gerência de Estudos Técnicos de Longo Prazo, Vale S.A.
xavier.prous@vale.com

Apresentação

As cavernas ferríferas constituem um patrimônio natural singular, cuja relevância extrapola os limites da ciência, alcançando dimensões ecológicas, culturais e socioeconômicas. Esses ambientes subterrâneos, formados ao longo de milhões de anos, coexistem com regiões de interesse econômico, o que impõe um desafio estratégico: harmonizar a exploração dos recursos naturais com a conservação dos ecossistemas subterrâneos.

Este livro surge como uma contribuição concreta para essa compatibilização. Seu objetivo é oferecer um conjunto abrangente de informações, metodologias e experiências que orientem práticas de gestão ambiental capazes de integrar desenvolvimento econômico e preservação. A obra apresenta protocolos de monitoramento, inovações tecnológicas e abordagens de gestão que se consolidam como ferramentas essenciais para a tomada de decisão responsável no contexto da espeleologia aplicada em um cenário recente de alterações nos marcos legais e de novas demandas para a gestão do patrimônio espeleológico.

Assim, cada capítulo reflete o esforço de especialistas que, com rigor técnico e visão multidisciplinar, buscam não apenas ampliar o conhecimento sobre as cavernas ferríferas, mas também propor soluções que conciliem produtividade, segurança e sustentabilidade. Essa construção coletiva, que envolve pesquisadores, consultores, órgãos reguladores e setor produtivo, confere à obra um caráter plural e de relevância prática, tornando-a referência para diferentes públicos.

Mais do que um repositório de informações, este livro pretende ser um guia para a gestão integrada de territórios onde o desenvolvimento e a conservação precisam coexistir. Ao sistematizar dados atualizados e experiências bem-sucedidas, ele contribui para o aprimoramento das políticas públicas, para a evolução das práticas empresariais e para o fortalecimento do diálogo entre ciência, sociedade e setor produtivo. Sua missão é consolidar e inspirar a aplicação de novos métodos e tecnologias que assegurem a continuidade das atividades econômicas sem comprometer a integridade de nosso acervo espeleológico.

Que esta publicação se consolide como um marco no debate sobre desenvolvimento sustentável e como um instrumento para aqueles que acreditam ser possível construir um futuro em que progresso e conservação caminhem lado a lado.

Os organizadores

Introduction

Ferriferous caves constitute a unique natural heritage whose significance extends beyond the limits of science, encompassing ecological, cultural, and socioeconomic dimensions. These subterranean environments, formed over millions of years, coexist with regions of economic interest, posing a strategic challenge: harmonizing the exploitation of natural resources with the conservation of subterranean ecosystems.

This book is a concrete contribution to this reconciliation. Its objective is to offer a comprehensive set of information, methodologies, and experiences that guide environmental management practices capable of integrating economic development and preservation. The work presents monitoring protocols, technological innovations, and management approaches that have established themselves as essential tools for responsible decision-making in the context of applied speleology, amid recent changes in legal frameworks and new demands for the management of speleological heritage.

Thus, each chapter reflects the efforts of experts who, with technical rigor and a multidisciplinary approach, seek not only to expand knowledge about ferriferous caves but also to propose solutions that balance productivity, safety, and sustainability. This collective effort, involving researchers, consultants, regulatory agencies, and the productive sector, gives the work a pluralistic and practically relevant character, making it a reference for diverse audiences.

More than a repository of information, this book aims to be a guide for the integrated management of territories where development and conservation must coexist. By systematizing updated data and successful experiences, it contributes to the improvement of public policies, the evolution of business practices, and the strengthening of dialogue between science, society, and the productive sector. Its mission is to consolidate and inspire the application of new methods and technologies that ensure the continuity of economic activities without compromising the integrity of our speleological heritage.

May this publication become a landmark in the debate about sustainable development and a tool for those who believe it is possible to build a future in which progress and conservation go hand in hand.

The organizers

Índice Index

1 16

INTRODUÇÃO AO GUIA DE BOAS PRÁTICAS PARA O MONITORAMENTO DE CAVERNAS FERRÍFERAS DO BRASIL

INTRODUCTION TO THE BEST PRACTICES GUIDE FOR MONITORING FERRIFEROUS CAVES IN BRAZIL

2 46

POR QUE MONITORAR CAVERNAS FERRÍFERAS?

WHY MONITOR FERRIFEROUS CAVES?

6 188

MONITORAMENTO GEOESTRUTURAL/ GEOTÉCNICO EM CAVERNAS FERRÍFERAS

GEOSTRUCTURAL/ GEOTECHNICAL MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES

7 232

MONITORAMENTO FOTOGRÁFICO EM CAVERNAS FERRÍFERAS

PHOTOGRAPHIC MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES

8 252

MONITORAMENTO SÍSMICO EM CAVERNAS FERRÍFERAS

SEISMIC MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES

3

70

MONITORAMENTO DA FAUNA EM CAVERNAS FERRÍFERAS

MONITORING FAUNA IN FERRIFEROUS CAVES

4

112

MONITORAMENTO DE MORCEGOS EM CAVIDADES FERRÍFERAS

MONITORING BATS IN FERRIFEROUS CAVES

5

150

MONITORAMENTO CLIMÁTICO EM CAVERNAS FERRÍFERAS

CLIMATE MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES

9

278

MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM CAVERNAS FERRÍFERAS

HYDROLOGICAL MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES

10

320

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE NOVOS MÉTODOS E TECNOLOGIAS PARA O MONITORAMENTO BIOLÓGICO DE CAVERNAS FERRÍFERAS

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NEW METHODS AND TECHNOLOGIES FOR BIOLOGICAL MONITORING OF FERRIFEROUS CAVES

11

348

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE NOVOS MÉTODOS E TECNOLOGIAS PARA O MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE FÍSICA DE CAVERNAS FERRÍFERAS

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NEW METHODS AND TECHNOLOGIES FOR MONITORING THE PHYSICAL INTEGRITY OF FERRIFEROUS CAVES

1



Região da Serra dos Carajás, Pará, Brasil
Region of Serra dos Carajás, Pará, Brazil
Foto/Photo: André B. Machado

Introdução ao guia de boas práticas para o monitoramento de cavernas ferríferas do Brasil

MATHEUS HENRIQUE SIMÕES
IURI VIANA BRANDI
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

1 OS GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS DO BRASIL E A OCORRÊNCIA DE CAVERNAS

O termo geossistema ferruginoso pode ser utilizado em referência a unidades espaciais cujo substrato litológico seja constituído por rochas ferruginosas (e.g. formações ferríferas bandadas (BIF), itabiritos, cangas, jaspilitos, metadiamictitos ferruginosos e filitos ferruginosos, entre outras) (Souza & Carmo, 2015). No Brasil, os geossistemas ferruginosos ocorrem em quatro estados, sendo divididos em, pelo menos, seis regiões: Pará (Serra dos Carajás), Bahia (Caetité), Minas Gerais (Vale do Rio Peixe Bravo, Bacia do Rio Santo Antônio e Quadrilátero Ferrífero) e Mato Grosso do Sul (Morraria de Urucum) (Figura 1). Da Figura 2 a Figura 13 são apresentados mapas, informações relevantes e imagens de cada uma dessas regiões. Para mais detalhes sobre essas regiões e o patrimônio espeleológico brasileiro associado a rochas ferruginosas, recomenda-se a leitura dos livros "Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais" (Carmo & Kamino, 2015) e "Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: Propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais" (Ruchkys *et al.*, 2015). Entre elas, destacam-se a região da Serra dos Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará, e o Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais. Essas são as regiões com maior área geográfica e com o maior número de cavernas conhecidas e oficialmente catalogadas. No entanto, são conhecidas outras áreas menores em extensão, mas com ocorrências de cavernas.

A Serra dos Carajás possui uma cadeia de montanhas com aproximadamente 1,6 milhão de rochas ferruginosas que integra a Província Mineral de Carajás, uma das mais ricas em depósitos de ferro do mundo. Geologicamente, a região é dominada por formações ferríferas bandadas (jaspilitos) pertencentes ao Grupo Grão Pará, com alternância de bandas de minerais silicosos (como quartzo e jaspe) e minerais opacos (como hematita e magnetita). Abriga depósitos de diversos minerais, como ferro, manganês, cobre, níquel, ouro, entre outros, com destaque para o minério de ferro. A região possui uma importante unidade de conservação de uso sustentável, a Floresta Nacional de Carajás, criada para compatibilizar a explotação das jazidas minerais com a conservação do meio ambiente (BRASIL, 1998). Outra importante unidade de conservação da região é o Parque

Introduction to the best practices guide for monitoring ferriferous caves in Brazil

MATHEUS HENRIQUE SIMÕES
IURI VIANA BRANDI
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

1 THE FERRUGINOUS GEOSYSTEMS OF BRAZIL AND THE OCCURRENCE OF CAVES

The term ferruginous geosystem can be used to refer to spatial units whose lithological substrate consists of ferruginous rocks (e.g., banded iron formations (BIF), itabirites, cangas, jaspilites, ferruginous metadiamictites, and ferruginous phyllites, among others) (Souza & Carmo, 2015). Ferruginous geosystems occur in four Brazilian states and are divided into at least six regions: Pará (Serra dos Carajás), Bahia (Caetité), Minas Gerais (Vale do Rio Peixe Bravo, Bacia do Rio Santo Antônio and Quadrilátero Ferrífero), and Mato Grosso do Sul (Morraria de Urucum) (Figure 1). Figures 2 to 13 present maps, relevant information, and images of each of these regions. For more details regarding these regions and the Brazilian speleological heritage associated with ferruginous rocks, we recommend the books "Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais" (Carmo & Kamino, 2015) and "Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: Propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais" (Ruchkys *et al.*, 2015). Notable among these regions are the Serra dos Carajás region, located in southeastern Pará State, and the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), in Minas Gerais State. These are the regions with the largest geographic area and the highest number of known and officially cataloged caves. However, other smaller areas that contain caves are known.

The Serra dos Carajás mountain range, encompassing approximately 1.6 million hectares of ferruginous rocks, is part of the Carajás Mineral Province, one of the richest iron deposits in the world. Geologically, the region is dominated by banded iron formations (jaspilites) belonging to the Grão Pará Group, with alternating bands of siliceous minerals (such as quartz and jasper) and opaque minerals (such as hematite and magnetite). It contains deposits of various minerals, such as iron, manganese, copper, nickel, gold, among others, with particular emphasis on iron ore. The region has an important sustainable use conservation unit, Floresta Nacional de Carajás, created to reconcile the exploitation of mineral deposits with environmental conservation (BRASIL, 1998). Another important conservation unit in the region is Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, created with the objectives of i)

Nacional dos Campos Ferruginosos, criado com os objetivos de i) proteger a diversidade biológica das serras da Bocaina, do Tarzan e suas paisagens naturais e valores abióticos associados; ii) garantir a perenidade dos serviços ecossistêmicos; iii) garantir a proteção do patrimônio espeleológico de formação ferrífera e da vegetação de campos rupestres ferruginosos; iv) contribuir para a estabilidade ambiental da região onde se insere; e v) proporcionar o desenvolvimento de atividades de recreação em contato com a natureza e do turismo ecológico (BRASIL, 2017). Essa unidade de conservação foi criada a partir de compensações ambientais vinculadas ao processo de licenciamento ambiental da Mina S11D, da mineradora Vale S.A. De acordo com dados disponíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), atualmente, são conhecidas 3.586 cavernas na região de Carajás, sendo que cerca de 10% estão inseridas dentro do Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, ou seja, possuem proteção integral.

O Quadrilátero Ferrífero, com uma área total de 700 mil hectares (Ruchkys *et al.*, 2015), sendo 357 mil hectares de rochas ferruginosas, está localizado na região central de Minas Gerais, é uma das províncias geológicas mais importantes do Brasil, reconhecida internacionalmente por sua complexidade tectônica e riqueza mineral, especialmente em ferro e ouro. A região é composta por terrenos arqueanos granito-gnáissicos, sequências vulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas e coberturas proterozóicas do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi. Essa estrutura forma um relevo montanhoso e compartimentado, com serras como as do Curral, da Moeda, de Ouro Branco, do Caraça e do Gandarela, que abrigam centenas de cavernas formadas, principalmente, em itabiritos, quartzitos e dolomitos. Atualmente, de acordo com os dados do CANIE, 2.523 cavernas são conhecidas nessa região. Diferentemente da Serra dos Carajás, no Quadrilátero Ferrífero as formações ferríferas ocorrem, em boa parte, muito próximas a ambientes urbanos e industrializados. No entanto, existem grandes áreas preservadas como o Parque Nacional da Serra do Gandarela, que abrange mais de 31 mil hectares nos municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima, criado para garantir a preservação de amostras do patrimônio biológico, geológico, espeleológico e hidrológico associado às formações de canga do Quadrilátero Ferrífero (Brasil, 2014); o Parque Estadual da Serra do Rola-Moça, com 4 mil hectares, que preserva, entre outros componentes ambientais, dezenas de cavernas ferríferas (Minas Gerais, 1994) e a Reserva Particular do Patrimônio Natural Santuário Caraça

protecting the biological diversity of the Bocaina and Tarzan mountain ranges and their natural landscapes and associated abiotic values; ii) ensuring the sustainability of ecosystem services; iii) ensuring the protection of the speleological heritage of ferriferous formation and the vegetation of ferruginous rocky fields; iv) contributing to the environmental stability of the region where it is located; and v) providing for the development of recreational activities in contact with nature and ecological tourism (BRASIL, 2017). This conservation unit was created from environmental compensation linked to the environmental licensing process of the S11D Mine, owned by the mining company Vale S.A. According to data available in Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), there are currently 3,586 known caves in the Carajás region, of which approximately 10% are located within Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, meaning they have full protection.

The Quadrilátero Ferrífero, covering a total area of 700,000 hectares (Ruchkys *et al.*, 2015), of which 357,000 hectares are ferruginous rocks, is located in the central region of Minas Gerais, is one of Brazil's most important geological provinces and is internationally recognized for its tectonic complexity and mineral wealth, especially iron and gold. The region is composed of Archean granite-gneiss terrains, volcano-sedimentary sequences of the Rio das Velhas Supergroup, and Proterozoic covers of the Minas Supergroup and Itacolomi Group. This structure forms a mountainous and compartmentalized relief, with mountain ranges such as Serra do Curral, Serra da Moeda, Serra do Ouro Branco, Serra do Caraça, and Serra do Gandarela, which shelter hundreds of caves formed primarily in itabirite, quartzite, and dolomite. Currently, according to CANIE data, 2,523 caves are known in this region. Unlike Serra dos Carajás, in the Quadrilátero Ferrífero, iron formations occur, for the most part, very close to urban and industrialized environments. However, there are large preserved areas such as Parque Nacional da Serra do Gandarela, which covers more than 31,000 hectares in the municipalities of Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito, and Rio Acima, created to ensure the preservation of samples of the biological, geological, speleological, and hydrological heritage associated with the canga formations of the Quadrilátero Ferrífero (Brazil, 2014); the Parque Estadual da Serra do Rola-Moça with 4,000 hectares, which preserves, among other environmental components, dozens of iron caves (Minas Gerais, 1994) and Reserva Particular do Patrimônio Natural Santuário Caraça,

(RPPN) com aproximadamente 10 mil hectares (Brasil, 1994). Dada a sua importância, Azevedo *et al.* (2012) propõem a criação do Geoparque Quadrilátero Ferrífero, destacando a magnitude que representa para a história da mineração no Brasil e da relevância de seu contexto geológico e evolução tectônica para a compreensão da história geológica da Terra, bem como seu potencial para o geoturismo como estratégia para integrar a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Dentre as outras regiões ferríferas do Brasil, a região de Caetité, localizada no sertão do estado da Bahia, é conhecida por abrigar a única unidade de concentração de urânio em atividade do Brasil. Porém, é também uma importante região de mineração de ferro, com uma área de aproximadamente 115 mil hectares de rochas ferruginosas. São conhecidas apenas 64 cavernas, de acordo com os dados disponíveis no CANIE, portanto, essa região ainda carece de estudos espeleológicos mais aprofundados para a real compreensão geológica e ecológica desses sistemas, conforme já destacado por Souza e Carmo (2015).

Por sua vez, a região da Bacia do Rio Santo Antônio está localizada na área de drenagem de rio homônimo e afluente do rio Doce, no estado de Minas Gerais, na região da Serra do Espinhaço Meridional. Possui uma significativa diversidade geológica e geomorfológica, com formações litológicas variadas, incluindo rochas do Grupo Espinhaço, formações ferríferas bandadas e coberturas lateríticas. Possui 228 mil hectares de rochas ferruginosas e são conhecidas 337 cavernas nesta litologia, de acordo com os dados do CANIE. O Vale do Rio Peixe Bravo, localizado no norte do estado de Minas Gerais, é notável pela presença de geossistemas ferruginosos e cavernas de relevante interesse científico. A região abriga grandes cavernas nessa formação, além importantes registros paleontológicos caracterizados, principalmente, pela presença de icnofósseis, incluindo paleotocas (Carmo, 2017). Além disso, já são conhecidos importantes sítios arqueológicos em abrigos e cavernas, principalmente com pinturas rupestres (Tobias-Júnior, 2017). A região possui cerca de 215 mil hectares de rochas ferruginosas e 112 cavernas conhecidas, porém, assim como as regiões anteriormente mencionadas, também carece de estudos espeleológicos mais robustos, incluindo a realização de prospecções espeleológicas mais detalhadas.

Finalmente, com uma área de 7 mil hectares de rochas ferruginosas, a última região ferruginosa é a Morraria de Urucum, localizada entre os municípios de Corumbá e Ladário, no Mato Grosso do Sul, sendo uma das formações geológicas

with about 10,000 hectares (Brasil, 1994). Given its importance, Azevedo *et al.* (2012) propose the creation of the Geoparque Quadrilátero Ferrífero, highlighting the magnitude it represents for the history of mining in Brazil and the relevance of its geological context and tectonic evolution for understanding the geological history of the Earth, as well as its potential for geotourism as a strategy to integrate environmental protection and sustainable development.

Among Brazil's other ferriferous regions, the Caetité region, located in the backlands of Bahia State, is known for housing Brazil's only active uranium concentration unit. However, it is also an important iron mining region, with an area of approximately 115,000 hectares of ferruginous rocks. Only 64 caves are known, according to data available from CANIE, therefore, this region still lacks more in-depth speleological studies for a true geological and ecological understanding of these systems, as highlighted by Souza and Carmo (2015).

In turn, the Bacia do Rio Santo Antônio region is located in the drainage area of the river of the same name and a tributary of the Rio Doce, in the state of Minas Gerais, in the Serra do Espinhaço Meridional region. It boasts significant geological and geomorphological diversity, with varied lithological formations, including rocks from the Espinhaço Group, banded iron formations, and lateritic covers. This region has 228,000 hectares of ferruginous rocks and 337 caves are known in this lithology, according to CANIE data. Vale do Rio Peixe Bravo, located in northern Minas Gerais State, is notable for the presence of ferruginous geosystems and caves of significant scientific interest. The region is home to large caves in this formation, as well as important paleontological records characterized primarily by the presence of trace fossils, including paleoburrows (Carmo, 2017). Furthermore, important archaeological sites in shelters and caves are already known, mainly with cave paintings (Tobias-Júnior, 2017). The region covers approximately 215,000 hectares of ferruginous rocks and has 112 known caves. However, as with the aforementioned regions, it lacks more robust speleological studies, including more detailed speleological surveys.

Finally, with an area of 7,000 hectares of ferruginous rocks, the last ferruginous region is Morraria de Urucum, located within the municipalities of Corumbá and Ladário in the state of Mato Grosso do Sul, which is one of the most prominent geological formations in the Pantanal of that state. The region is composed of Archean crystalline basement rocks, such as



Figura 1: Localização dos seis geossistemas ferruginosos do Brasil.
Figure 1: Location of the six ferruginous geosystems in Brazil.

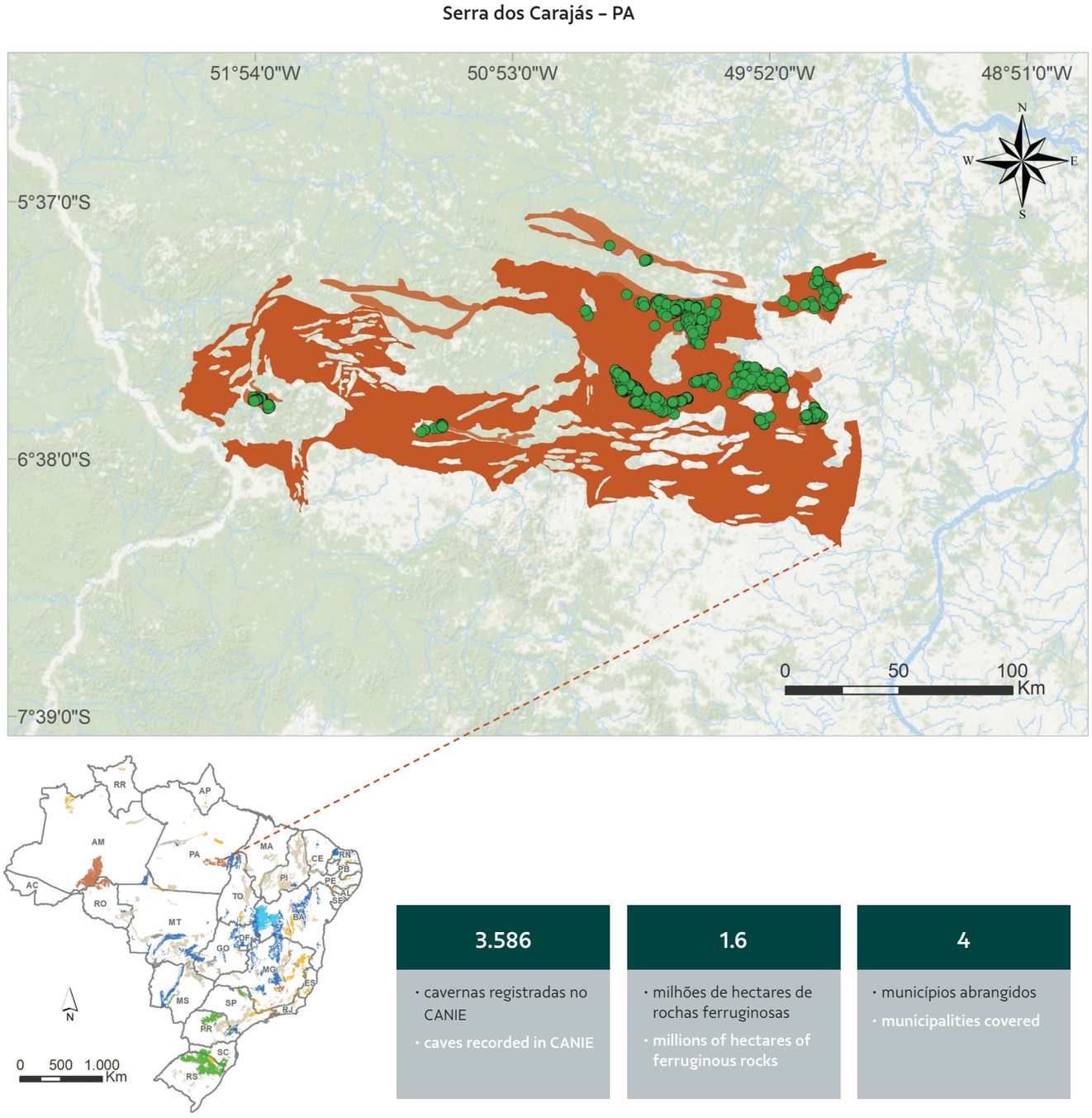


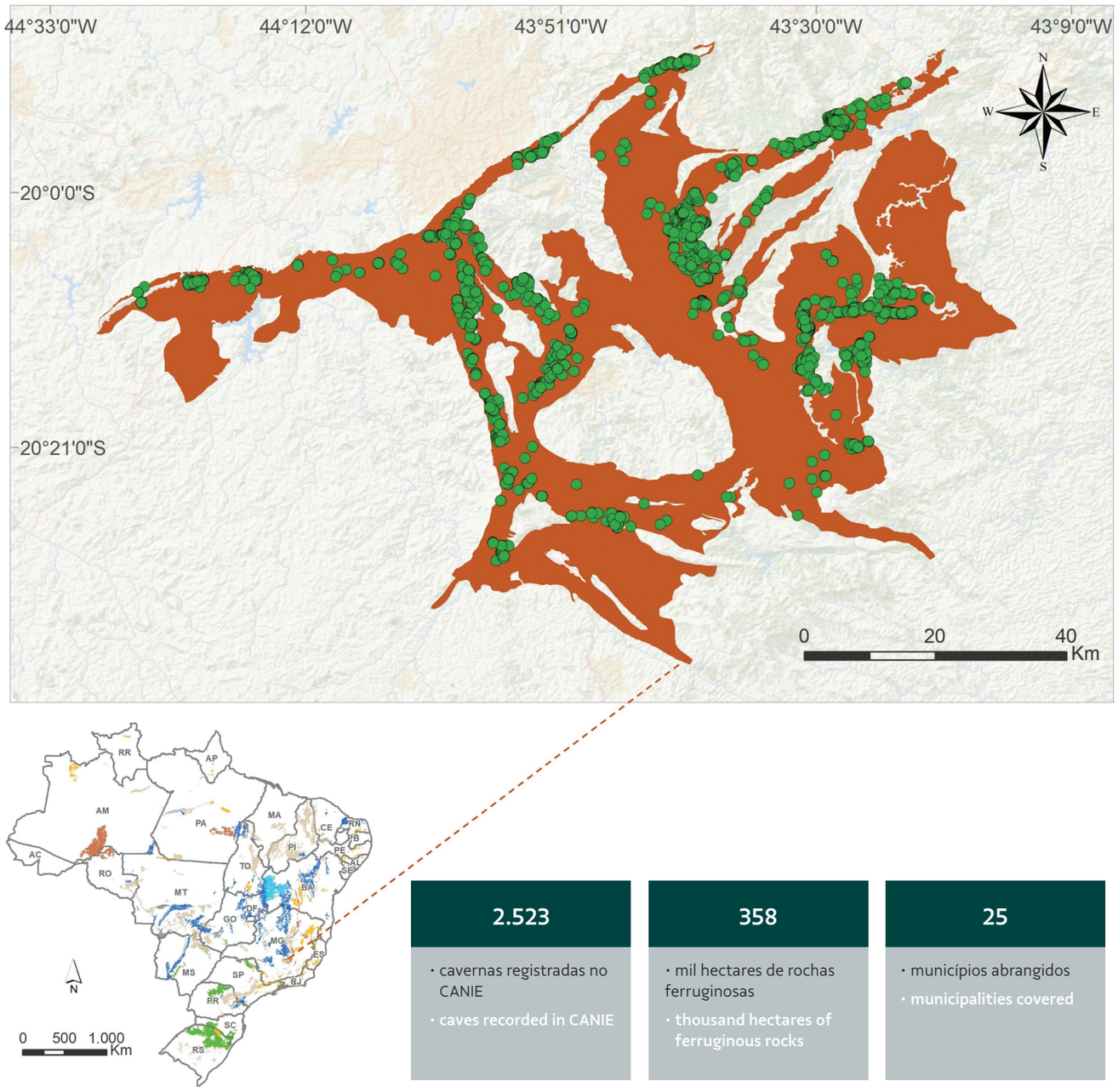
Figura 2: Localização da região e das cavernas ferríferas conhecidas na Serra dos Carajás, estado do Pará. Número de cavernas registradas no CANIE até 02 de outubro de 2025.

Figure 2: Location of the region and known ferriferous caves in Serra dos Carajás, state of Pará. Number of caves recorded in CANIE as of October 2, 2025.



Figura 3: Campos ferruginosos de Serra Sul, região da Serra dos Carajás, município de Canaã dos Carajás, Pará. Foto: Acervo Vale.
Figure 3: Ferruginous fields of Serra Sul in the Serra dos Carajás region, municipality of Canaã dos Carajás, state of Pará. Photo: Vale Collection.

Quadrilátero Ferrífero – MG



2.523	358	25
· cavernas registradas no CANIE · caves recorded in CANIE	· mil hectares de rochas ferruginosas · thousand hectares of ferruginous rocks	· municípios abrangidos · municipalities covered

Figura 4: Localização da região e das cavernas ferríferas conhecidas para Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. Número de cavernas registradas no CANIE até 02 de outubro de 2025.

Figure 4: Location of the region and known ferriferous caves for the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. Number of caves registered in CANIE as of October 2, 2025.

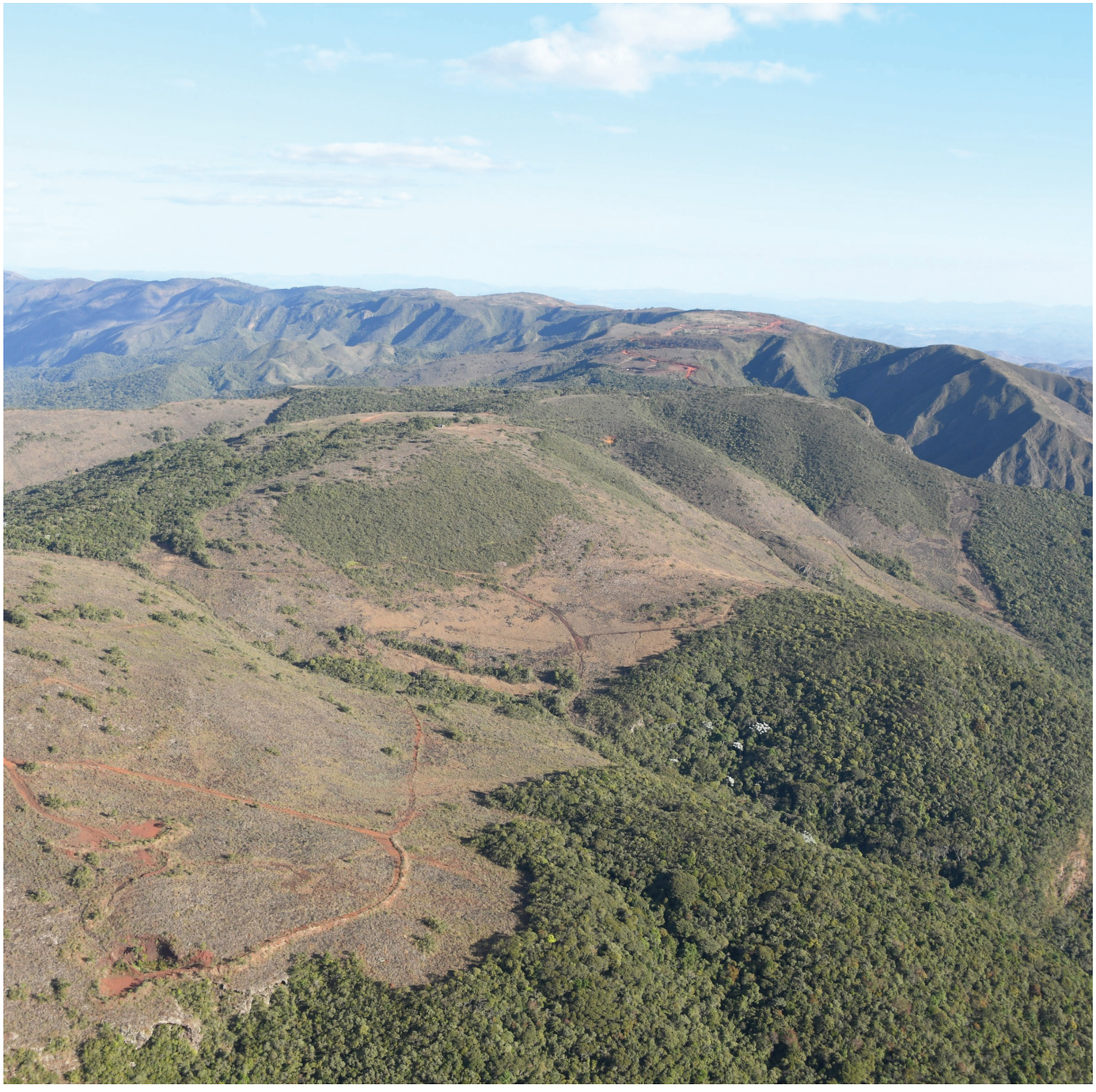


Figura 5: Campos ferruginosos do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. Foto: Acervo Vale.
Figure 5: Ferruginous fields of Parque Nacional da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. Photo: Vale Collection.

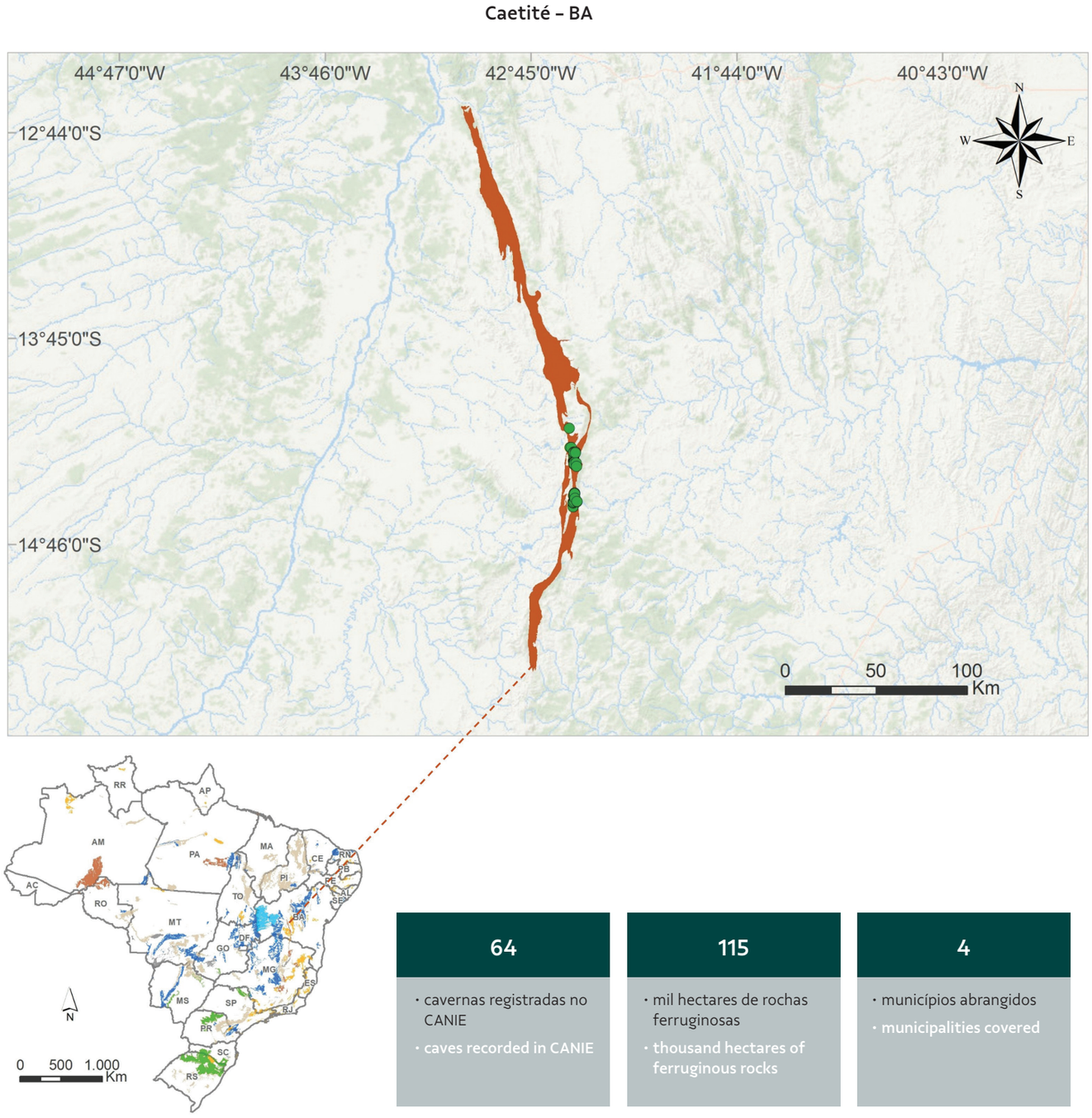


Figura 6: Localização da região e das cavernas ferríferas conhecidas para Caetité, estado da Bahia. Número de cavernas registradas no CANIE até 02 de outubro de 2025.

Figure 6: Location of the region and known ferriferous caves in Caetité, state of Bahia. Number of caves registered in CANIE as of October 2, 2025.



Figura 7: Campos ferruginosos da região de Caetité, estado da Bahia. Foto: Allan S. Calux.
Figure 7: Ferruginous fields in the Caetité region, state of Bahia. Foto: Allan S. Calux.

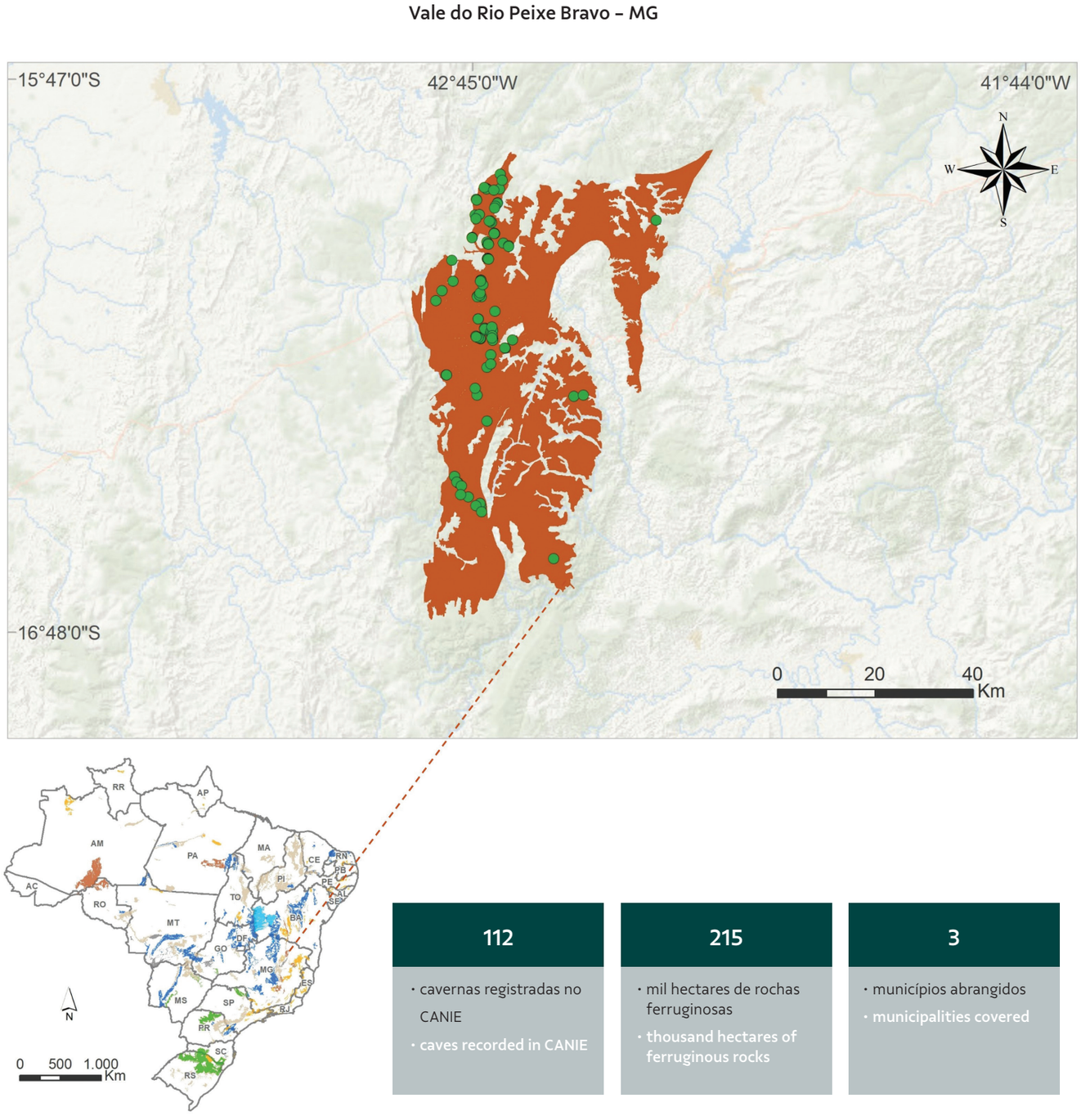


Figura 8: Localização da região e das cavernas ferríferas conhecidas para o Vale do Rio Peixe Bravo, estado de Minas Gerais. Número de cavernas registradas no CANIE até 02 de outubro de 2025.

Figure 8: Location of the region and the known ferriferous caves for Vale do Rio Peixe Bravo, state of Minas Gerais. Number of caves registered in CANIE as of October 2, 2025.



Figura 9: Vale do Rio Peixe Bravo, estado de Minas Gerais. Foto: Rodrigo L. Ferreira.
Figure 9: Vale do Rio Peixe Bravo, state of Minas Gerais. Photo: Rodrigo L. Ferreira.

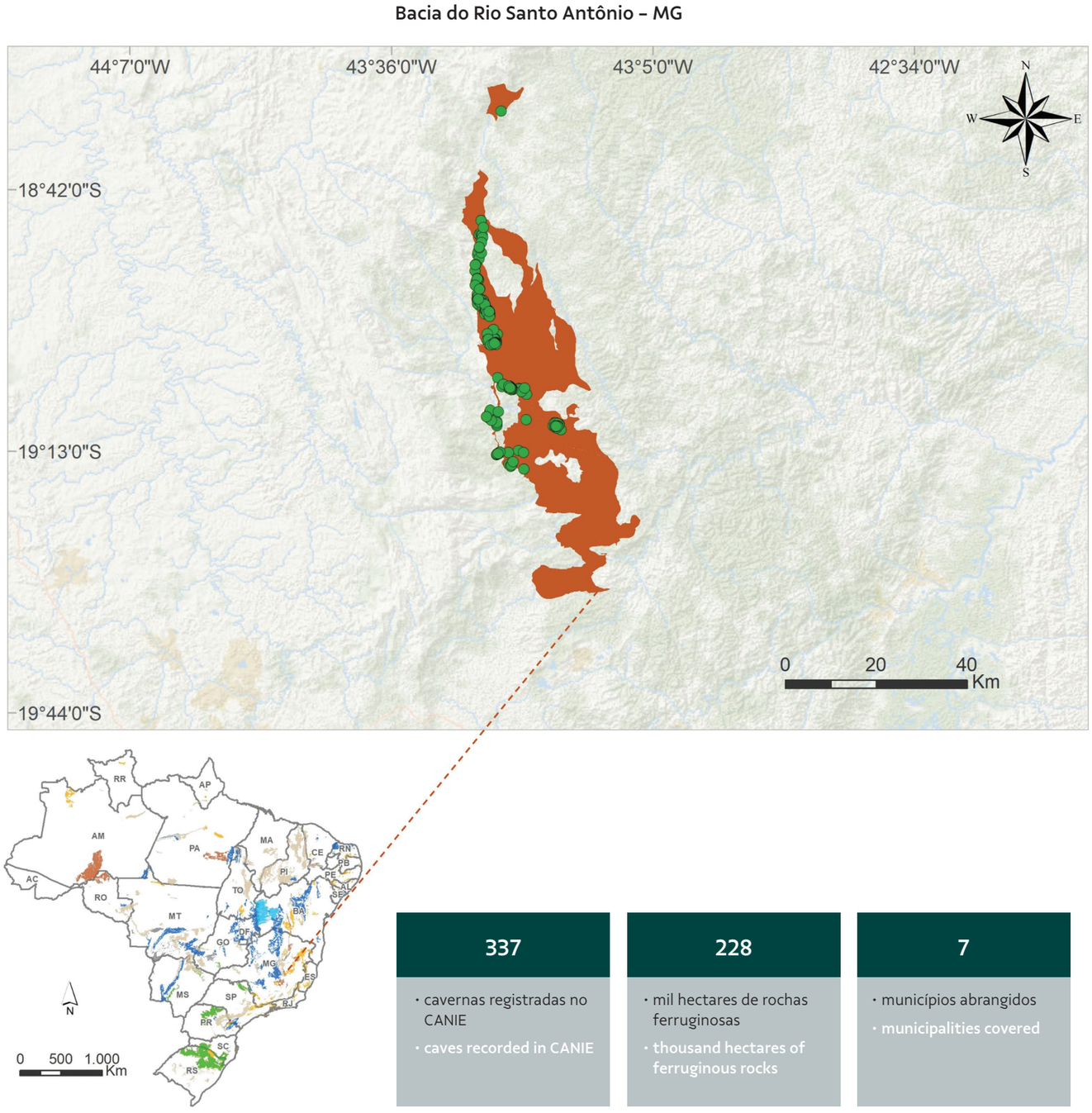


Figura 10: Localização da região e das cavernas ferríferas conhecidas para a Bacia do Rio Santo Antônio, estado de Minas Gerais. Número de cavernas registradas no CANIE até 02 de outubro de 2025.

Figure 10: Location of the region and the ferriferous caves known for Bacia do Rio Santo Antônio, state of Minas Gerais. Number of caves registered in CANIE as of October 2, 2025.



Figura 11: Campos ferruginosos da Bacia do Rio Santo Antônio, estado de Minas Gerais. Foto: Acervo Vale.

Figure 11: Ferruginous fields of Bacia do Rio Santo Antônio, state of Minas Gerais. Photo: Acervo Vale.

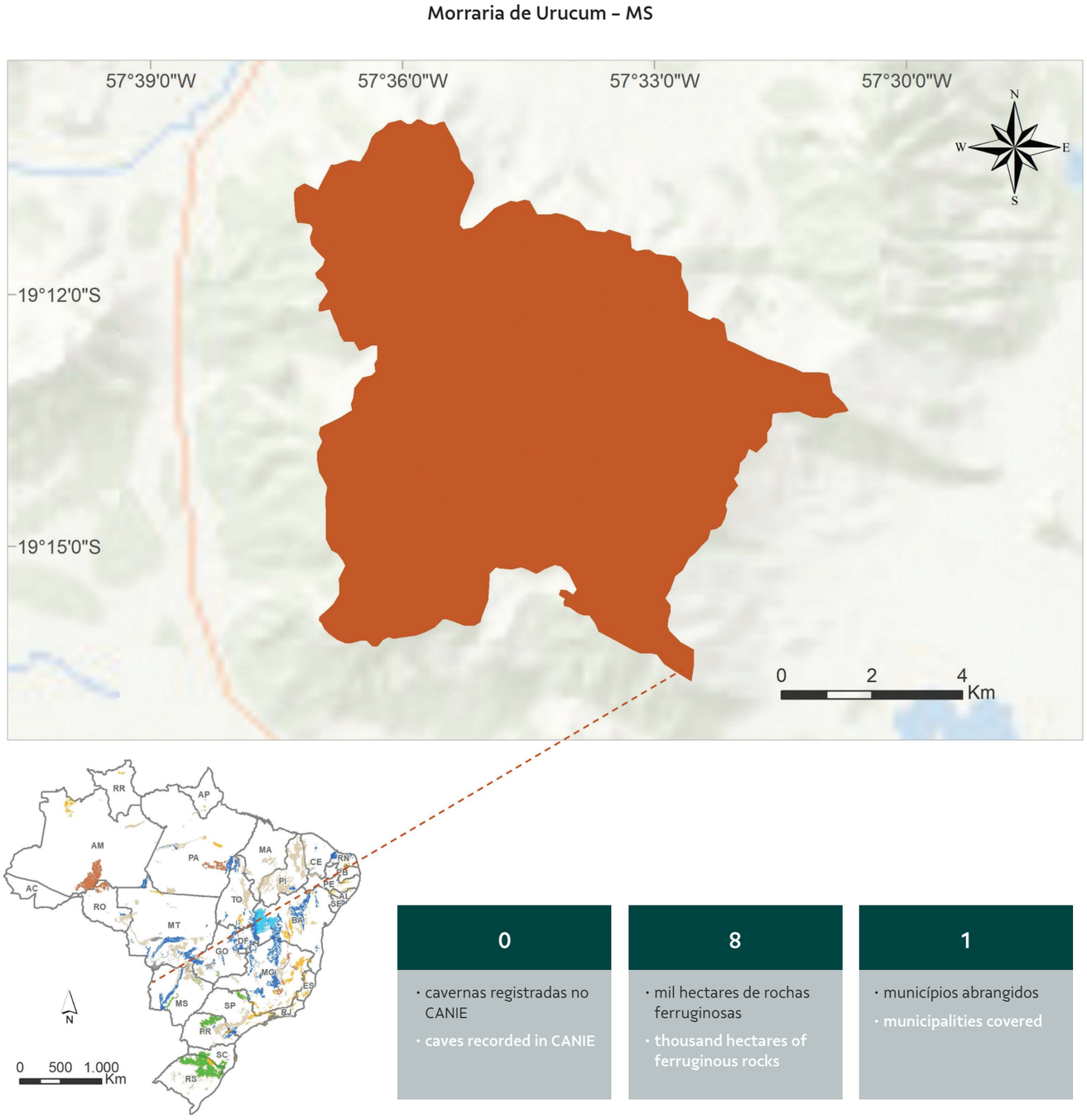


Figura 12: Localização da região da Morraria de Urucum, estado do Mato Grosso do Sul. Essa é a única região ferrífera do Brasil com ausência de registro de cavernas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE.

Figure 12: Location of the region of Morraria de Urucum, state of Mato Grosso do Sul. This is the only ferriferous region in Brazil with no record of caves in the Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE).



Figura 13: Campos ferruginosos na região da Morraria de Urucum, estado do Mato Grosso do Sul. Foto: Thiago F. Lima.

Figure 13: Ferruginous fields in the region of Morraria de Urucum, state of Mato Grosso do Sul. Photo: Thiago F. Lima.



Figura 14: Gruta do Simmons, localizada no município de Barão de Cocais, estado de Minas Gerais. Caverna nomeada em homenagem ao geólogo americano George Simmons. Foto: Robson de A. Zampaulo.

Figure 14: Gruta do Simmons, located in the municipality of Barão de Cocais, state of Minas Gerais. Cave named in homage to the American geologist George Simmons. Photo: Robson de A. Zampaulo.

mais proeminentes do Pantanal Sul-Mato-Grossense. A região é composta por rochas do embasamento cristalino arqueano, como granitos e gnaisses, sobrepostas por formações ferríferas bandadas e depósitos de manganês da Formação Jacadigo e da Formação Urucum. Apesar do potencial para ocorrência de cavernas, de acordo com os dados do CANIE, nenhum registro é conhecido até o momento.

Segundo Piló e Auler (2005), a ocorrência de cavernas nas regiões ferríferas do Brasil é reconhecida desde o século XIX, tendo sido os trabalhos pioneiros do francês Noël Aimé Pissis os primeiros a descrever cavernas e espeleotemas no itabirito do Quadrilátero Ferrífero. Já na década de 1960, é importante destacar a atuação do geólogo americano George Simmons por ter sido o primeiro a idealizar como essas cavernas são formadas (Piló, Coelho & Reino, 2015). Em reconhecimento a esses trabalhos, uma caverna localizada no município de Barão de Cocais, estado de Minas Gerais, foi nomeada em sua homenagem – Gruta do Simmons (Figura 14), assim como uma espécie de ácaro descrito para cavernas da região, *Neocarus simmonsi* Bernardi, Zampaulo & Oliveira 2020. Já na década de 1970 foram documentados os primeiros trabalhos na região da Serra dos Carajás, que viria a tornar-se a região com a maior quantidade e com as maiores cavernas em rochas ferríferas do mundo (Auler *et al.* 2022). De fato, essas duas regiões, Quadrilátero Ferrífero e Serra dos Carajás, são as que possuem o maior número de cavernas conhecidas atualmente (Figura 15). Porém, importantes sítios espeleológicos são encontrados na região do Vale do Rio Peixe Bravo, incluindo registros paleontológicos e arqueológicos de relevante interesse científico, além de elevada importância ecológica (Carmo & Kamino, 2017). A região da Bacia do Rio Santo Antônio também apresenta centenas de cavernas, entre as quais destaca-se o sistema da Lapa do Grotão, uma das maiores cavernas em rochas ferríferas do Brasil com 451 metros de desenvolvimento (Rubbioli *et al.* 2019).

Conforme pode ser observado na Figura 16, é possível notar um aumento do número de cavernas conhecidas para o Brasil a partir do início do século XXI. Até 2008, marco importante da mudança na legislação de proteção do patrimônio espeleológico brasileiro e do rito do licenciamento ambiental que passou a exigir estudos mais detalhados sobre esses ambientes, eram conhecidas apenas 5.906 cavernas no país. Hoje esse número já ultrapassou a marca de 30 mil cavernas, conforme dados obtidos do CANIE até dezembro de 2025. Concomitantemente, dada a importância econômica das regiões ferríferas, foi a partir desse

granites and gneisses, overlain by banded iron formations and manganese deposits of the Jacadigo and Urucum Formations. Despite the potential for cave formations, according to CANIE data, no records are known to date.

According to Piló and Auler (2005), the existence of caves in the ferriferous regions of Brazil has been recognized since the 19th century, with the pioneering work of Frenchman Noël Aimé Pissis being the first to describe caves and speleothems in the itabirite of the Quadrilátero Ferrífero. In the 1960s, the important work of American geologist George Simmons must be highlighted for being the first to conceptualize how these caves are formed (Piló, Coelho & Reino, 2015). In recognition of this work, a cave located in the municipality of Barão de Cocais, Minas Gerais State, was named in his honor – Gruta do Simmons (Figure 14) – as was a species of mite described for caves in the region – *Neocarus simmonsi* Bernardi, Zampaulo & Oliveira 2020. The 1970s brought the first documented works in the Serra dos Carajás region, which would become the region with the most and largest ferriferous rock caves in the world (Auler *et al.* 2022). In fact, these two regions, the Quadrilátero Ferrífero and Serra dos Carajás, have the largest number of caves currently known (Figure 15). However, important speleological sites are found in the Vale do Rio Peixe Bravo region, including paleontological and archaeological records of relevant scientific interest, as well as high ecological importance (Carmo & Kamino, 2017). The Bacia do Rio Santo Antônio region also has hundreds of caves, among which the Lapa do Grotão system stands out as one of the largest ferriferous caves in Brazil with a depth of 451 meters (Rubbioli *et al.* 2019).

Figure 16 shows the increase in the number of known caves in Brazil since the beginning of the 21st century. Until 2008 – a significant milestone in legislation protecting Brazil's speleological heritage and in the environmental licensing process, which began to require more detailed studies of these environments – only 5,906 caves were known in the country. According to CANIE data up to December 2025, this number has surpassed 30,000 caves. Concomitantly, given the economic importance of ferriferous regions, it was from this moment on

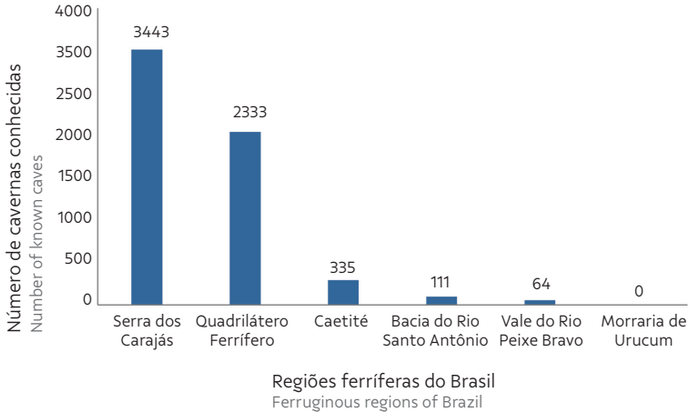


Figura 15: Número de cavernas conhecidas para as regiões ferríferas do Brasil. Fonte: Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE.

Figure 15: Number of known caves in the ferriferous regions of Brazil. Source: Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE).

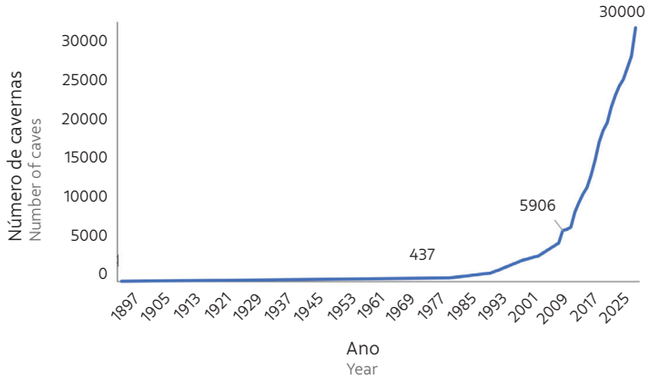


Figura 16: Número de cavernas no Brasil ao longo dos anos. Fonte: Modificado do Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2023 – 2024).

Figure 16: The number of recorded caves in Brazil over the years. Source: Modified from Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2023 – 2024).

momento que as cavernas nessa litologia foram reconhecidas. Segundo Piló, Coelho & Reino (2015), as cavernas ferríferas eram praticamente desconhecidas ou mesmo ignoradas pela comunidade espeleológica nacional.

De acordo com os dados mais recentes disponibilizados no "Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2023–2024", atualmente as cavernas em rochas ferríferas representam cerca de 20% do patrimônio espeleológico nacional (CECAV, 2025). Esse número é bastante significativo, principalmente quando consideramos que até início dos anos 2000 eram conhecidas apenas algumas dezenas de cavernas nessa litologia. As mudanças que ocorreram na legislação de proteção ao patrimônio espeleológico e a crescente demanda global por minério de ferro foram as fontes impulsionadoras desse crescimento.

Apesar de obrigatoriamente terem de ser consideradas, estudadas e preservadas dentro dos processos de licenciamento ambiental desde o final da década de 1980, com a inclusão desses ecossistemas como bens da União pela Constituição Federal do Brasil de 1988, apenas com a mudança ocorrida com a publicação do Decreto Federal nº 6.640, em 2008, as cavernas passaram, de fato, a serem estudadas e consideradas de forma ampla. A partir desse ano, algumas cavernas passaram a ser passíveis de impactos negativos irreversíveis, desde que previamente estudadas, classificadas pela sua relevância de acordo com critérios específicos estabelecidos em instruções normativas do

that caves in this lithology were recognized. According to Piló, Coelho & Reino (2015), ferriferous caves were virtually unknown or even ignored by the national speleological community.

According to the most recent data available in the "Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2023 – 2024," ferriferous rock caves currently represent approximately 20% of the country's speleological heritage (CECAV, 2025). This figure is quite significant, especially considering that only a few dozen caves were known in this lithology until the early 2000s. Changes in legislation protecting speleological heritage and the growing global demand for iron ore have been the driving forces behind this growth.

Although it had been required that caves be considered, studied, and preserved in environmental licensing processes since the late 1980s, with the inclusion of these ecosystems as federal assets in the 1988 Constituição Federal do Brasil, it was only with the change that occurred with the publication of Decreto Federal nº 6640 in 2008 that caves began to be studied and considered broadly. Starting that year, some caves became susceptible to irreversible negative impacts, provided they were previously studied, classified by their relevance according to specific criteria established in normative instructions from the Ministério do Meio Ambiente do Brasil, and validated by the appropriate environmental agencies. At that time, there was

Ministério do Meio Ambiente do Brasil e validadas pelos órgãos ambientais competentes. Nesse momento, houve um boom de estudos que, até hoje, geram conhecimento imensurável sobre esse patrimônio.

De fato, os estudos vinculados aos processos de licenciamento ambiental são hoje os principais geradores de informações sobre as cavernas em rochas ferríferas do Brasil. Além disso, as compensações ambientais pelos impactos autorizados nessas cavernas aportam milhões de reais a cada ano, fomentando o desenvolvimento de pesquisas científicas e ações de preservação do patrimônio espeleológico brasileiro. Segundo dados do ICMBio/CECAV, atualmente existem, apenas na esfera federal, mais de 100 projetos sendo financiados a partir desse tipo de recurso financeiro (CECAV, 2024). Da mesma forma, inúmeros outros processos de compensação ambiental espeleológica estão sendo conduzidos pelos estados e, mais recentemente, pelos municípios. No entanto, não existe ainda uma transparência sobre a destinação dos recursos que devem, obrigatoriamente, ser utilizados em estratégias para conservação do patrimônio espeleológico brasileiro.

2 USO ANTRÓPICO DAS ÁREAS FERRUGINOSAS E OS DESAFIOS PARA COMPATIBILIZAR DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E A CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO

A história de ocupação humana está intrinsecamente ligada à exploração dos recursos naturais. Entre esses, a mineração e a produção de alimentos se destacam como atividades centrais para o desenvolvimento econômico, especialmente no Brasil. No entanto, em áreas com rochas ferruginosas, como cangas e itabiritos, a produção agropecuária é limitada devido à baixa fertilidade dos solos. Por outro lado, essas regiões são ricas em minério de ferro, matéria-prima essencial para todos os setores da sociedade, em especial na indústria do aço, com aplicações na construção civil, setor automotivo, eletrônico e outros.

Embora a agropecuária não se instale diretamente sobre os campos ferruginosos, sua expansão periférica pode gerar impactos indiretos significativos sobre a biodiversidade, decorrentes do desmatamento, fragmentação de habitats, exploração dos recursos hídricos, utilização de herbicidas e alteração do microclima. Embora a expansão agrícola desordenada seja um fenômeno histórico na região Norte do Brasil, na área da Floresta Nacional de Carajás, no sudeste do

a *boom* in studies that, to this day, generate immeasurable knowledge about this heritage.

Indeed, studies linked to environmental licensing processes are currently the main sources of information about Brazil's ferriferous rock caves. Furthermore, environmental compensation for authorized impacts on these caves generates millions of reais each year, fostering the development of scientific research and actions to preserve Brazil's speleological heritage. According to data from ICMBio/CECAV, there are currently more than 100 projects being financed with this type of funding at the federal level alone (CECAV, 2024). Similarly, numerous other speleological environmental compensation processes are being conducted by states and, more recently, by municipalities. However, there is still no transparency regarding the allocation of resources that must be used for conservation strategies for Brazil's speleological heritage.

2 ANTHROPOGENIC USE OF FERRUGINOUS AREAS AND THE CHALLENGES OF RECONCILING ECONOMIC DEVELOPMENT WITH THE CONSERVATION OF SPELEOLOGICAL HERITAGE

The history of human occupation is intrinsically linked to the exploitation of natural resources. Among these, mining and food production stand out as central activities for economic development, especially in Brazil. However, in areas with ferruginous rocks, such as canga and itabirite, agricultural production is limited due to low soil fertility. On the other hand, these regions are rich in iron ore, an essential raw material for all sectors of society, especially the steel industry, with applications in civil construction and the automotive and electronics sectors, among others.

Although agriculture does not directly establish itself on ferruginous fields, its peripheral expansion can generate significant indirect impacts on biodiversity, resulting from deforestation, habitat fragmentation, water resource exploitation, herbicide use, and microclimate alteration. Although disorderly agricultural expansion is a historical phenomenon in the North Region of Brazil, legal protection has played a crucial role in controlling the advance of the agricultural frontier in Floresta Nacional de Carajás in southeastern Pará, as

Pará, a proteção legal tem desempenhado um papel crucial no controle do avanço da fronteira agrícola. Esse efeito pode ser observado na Figura 17. Além disso, a expansão urbana em áreas ferruginosas, como no Quadrilátero Ferrífero, representa outro aspecto de pressão sobre os ambientes naturais ainda preservados. O valor paisagístico de serras ainda preservadas no Quadrilátero Ferrífero e a proximidade com centros de mineração têm incentivado o surgimento de bairros e condomínios em áreas ambientalmente sensíveis, exigindo políticas de ordenamento territorial e mitigação de impactos ambientais. Na Figura 18 é possível observar a proximidade de áreas urbanas em relação às áreas de formação ferrífera, o que requer atenção para a devida mitigação e controle de possíveis impactos a esses ambientes.

A mineração é, sem dúvida, um setor estratégico para o desenvolvimento nacional, gerando empregos, infraestrutura e arrecadação fiscal. A mineração sustentável, quando orientada por critérios técnicos, legais e ambientais rigorosos, representa uma estratégia viável para compatibilizar o uso dos recursos minerais com a conservação dos ecossistemas ferruginosos. A aplicação de protocolos de monitoramento espeleológico, o licenciamento ambiental baseado em estudos de impacto detalhados, e a adoção de tecnologias de baixo impacto permitem que a atividade mineral seja conduzida com controle e mitigação de riscos. Em áreas com ocorrência de cavernas em rochas ferríferas, a mineração responsável pode contribuir para o mapeamento, proteção e gestão dessas estruturas naturais, promovendo inclusive ações de compensação ambiental e recuperação de áreas degradadas. Assim, a mineração sustentável não apenas reduz os potenciais impactos negativos, como também pode atuar como vetor de conhecimento científico e conservação ambiental.

Segundo Tibbett (2015), os desafios do pós-fechamento de minas incluem não apenas a reabilitação ecológica das áreas afetadas, mas também a reintegração social das comunidades impactadas. Isso exige planejamento de longo prazo, monitoramento contínuo e políticas públicas eficazes. Nesse contexto, a adoção de práticas sustentáveis torna-se essencial. Isso inclui: o cumprimento rigoroso da legislação ambiental brasileira; o incentivo à pesquisa científica sobre cavernas e ecossistemas associados; a implementação de planos de manejo e recuperação ambiental com base em evidências técnicas e, principalmente, o estabelecimento de um plano diretor eficiente, que permita a delimitação ordenada das áreas de uso e de áreas com vocação para conservação. Equilibrar os benefícios econômicos da mineração com a conservação dos geossistemas

seen in Figure 17. Furthermore, urban expansion in ferruginous areas, such as the Quadrilátero Ferrífero, represents another aspect of pressure on still-preserved natural environments. The scenic value of the still-preserved mountain ranges in the Quadrilátero Ferrífero and the proximity to mining centers have encouraged the emergence of neighborhoods and condominiums in environmentally sensitive areas, which require land use planning and environmental impact mitigation policies. Figure 18 shows the proximity of urban areas in relation to ferriferous formations areas, which requires attention for the proper mitigation and control of possible impacts to these environments.

Mining is undoubtedly a strategic sector for national development, generating jobs, infrastructure, and tax revenue. When guided by rigorous technical, legal, and environmental standards, sustainable mining represents a viable strategy for reconciling mineral resource use with the conservation of ferruginous ecosystems. The implementation of speleological monitoring protocols, environmental licensing based on detailed impact assessments, and the adoption of low-impact technologies allow mining activities to be conducted with controlled and mitigated risks. In areas containing caves in ferruginous rock formations, responsible mining can contribute to the mapping, protection, and management of these natural structures, including the promotion of effective environmental compensation and restoration of degraded areas. Thus, sustainable mining not only reduces potential negative impacts but also serves as a driver for scientific knowledge and environmental conservation.

According to Tibbett (2015), the challenges of post-mine closure include not only the ecological rehabilitation of affected areas but also the social reintegration of impacted communities. This requires long-term planning, continuous monitoring, and effective public policies. In this context, the adoption of sustainable practices becomes essential. This includes strict compliance with Brazilian environmental legislation, encouragement of scientific research on caves and associated ecosystems, the implementation of environmental management and recovery plans based on technical evidence, and, most

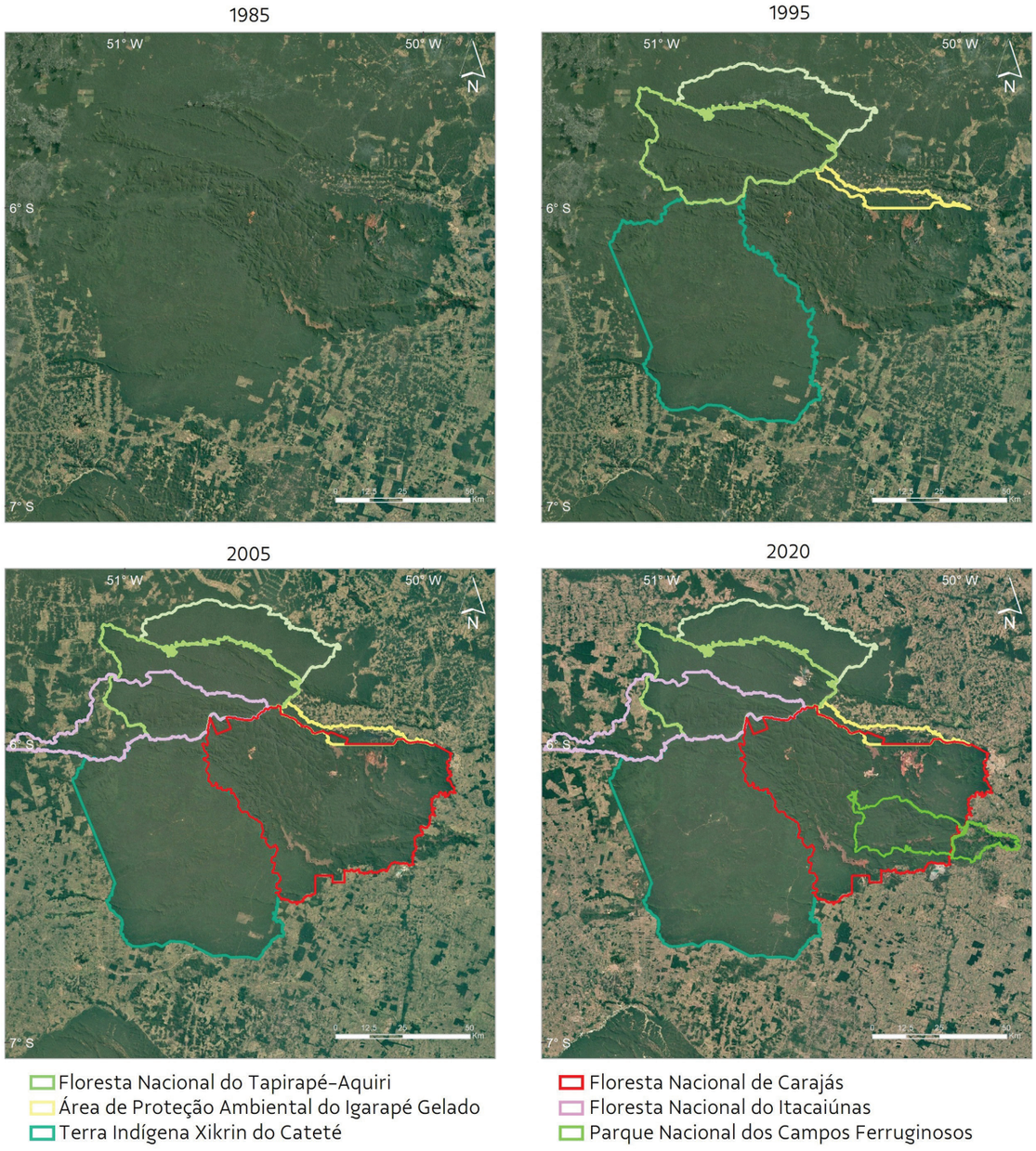


Figura 17: Série temporal mostrando o avanço do desmatamento para expansões agropecuárias na região sudeste do estado do Pará, destacando a proteção fornecida pela criação de Unidades de Conservação que hoje integram o Mosaico de de Carajás (Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, Terra Indígena Xikrin do Cateté, Floresta Nacional de Carajás, Floresta Nacional do Itacaiúnas e Parque Nacional dos Campos Ferruginosos).

Figure 17: Time series showing the advance of deforestation for agricultural expansion in the southeastern region of the state of Pará, highlighting the protection provided by the creation of Conservation Units that currently comprise the Carajás Mosaic (Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, Terra Indígena Xikrin do Cateté, Floresta Nacional de Carajás, Floresta Nacional do Itacaiúnas e Parque Nacional dos Campos Ferruginosos).

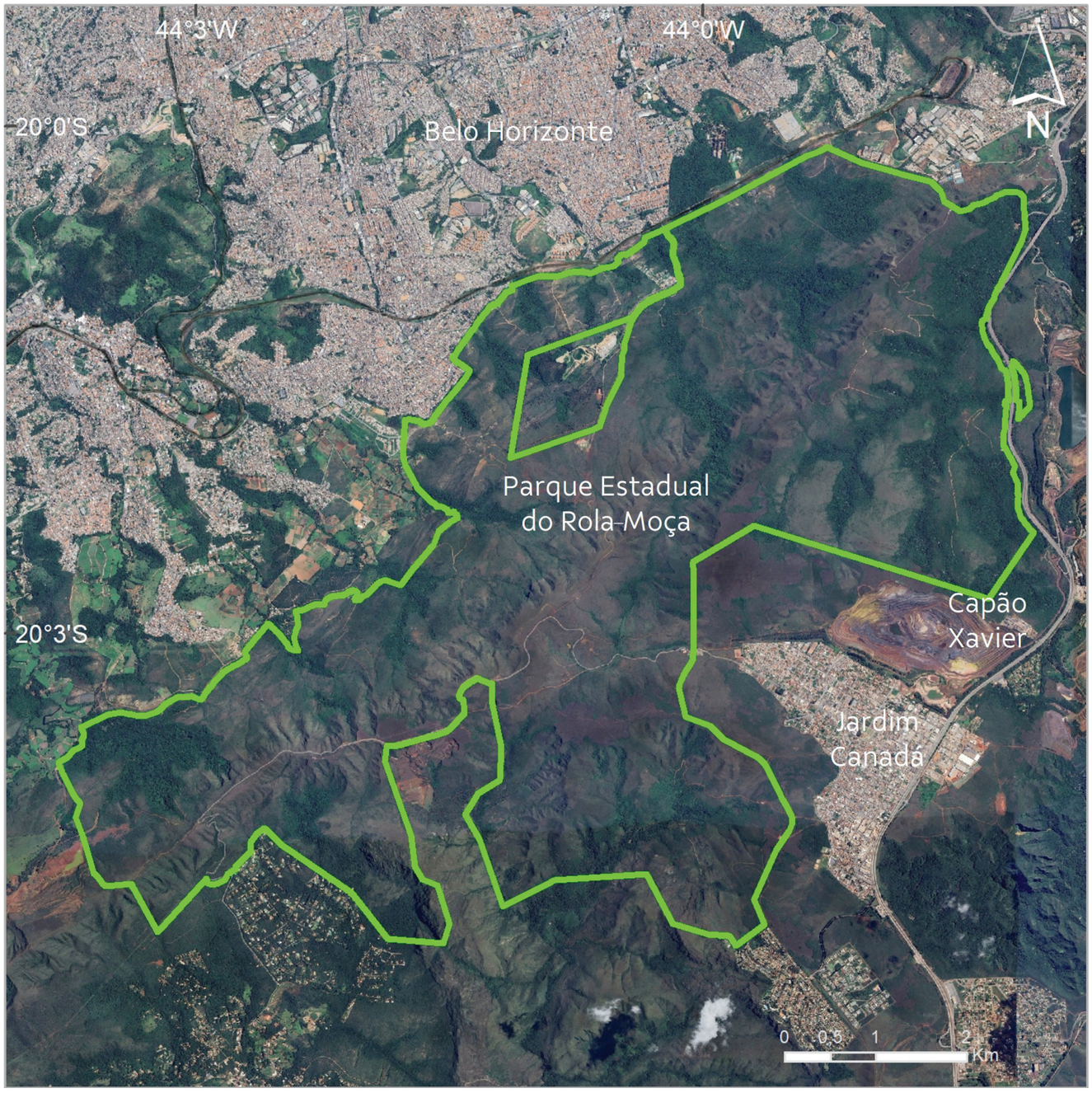


Figura 18: Proximidade de áreas urbanas com áreas de formações ferríferas no estado de Minas Gerais. A figura mostra os campos ferruginosos do Parque Estadual do Rola-Moça, as cidades de Belo Horizonte, Nova Lima (Jardim Canadá) e a Mina de Capão Xavier.

Figure 18: Proximity of urban areas in relation to ferriferous formations areas in the state of Minas Gerais. The figure shows the ferrigenous formations of Rola-Moça State Park and the cities of Belo Horizonte and Nova Lima (Jardim Canadá), as well as the Capão Xavier Mine.



Figura 19: Vista do interior da caverna CPMT_0021, na região do Quadrilátero Ferrífero, no município de Nova Lima, Minas Gerais. Ao fundo, uma mineração em atividade. Foto: Matheus H. Simões.

Figure 19: View of the interior of cave CPMT_0021, in the Quadrilátero Ferrífero, municipality of Nova Lima, Minas Gerais. A mining operation can be seen in the background. Photo: Matheus H. Simões.

ferruginosos é um desafio complexo, mas possível, e necessário para garantir um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

3 AS CAVERNAS FERRÍFERAS E O MONITORAMENTO ESPELEOLÓGICO VINCULADO AOS PROCESSOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL

As cavernas são ambientes subterrâneos de grande relevância ambiental (ecológica, geológica, hidrológica, arqueológica, paleontológica, entre outros). Além disso, são consideradas bens da União de acordo com a Constituição Federal do Brasil promulgada em 1988. Por isso, esses ambientes estão no centro das discussões sobre conservação e desenvolvimento sustentável, já que boa parte ocorre em áreas de grande interesse econômico. Segundo dados do CECAV, cerca de 65% das cavernas brasileiras estão em áreas de interesse para desenvolvimento de empreendimentos econômicos (Figura 20).

No Brasil, o licenciamento ambiental de empreendimentos que possam afetar cavidades naturais subterrâneas (cavernas) exige a realização de estudos espeleológicos prévios. Esses

importantly, the establishment of an efficient master plan that allows for the orderly demarcation of areas of use and areas with potential for conservation. Balancing the economic benefits of mining with the conservation of ferruginous geosystems is a complex but possible challenge, and necessary to ensure a truly sustainable development model.

3 FERRIFEROUS CAVES AND SPELEOLOGICAL MONITORING LINKED TO ENVIRONMENTAL LICENSING PROCESSES

Caves are subterranean environments of great environmental significance (ecological, geological, hydrological, archaeological. Furthermore, they are considered federal assets according to the Constituição Federal do Brasil, enacted in 1988. Therefore, these environments are at the center of discussions on conservation and sustainable development, as many of them occur in areas of significant economic interest. According to CECAV data, approximately 65% of Brazilian caves are in areas of interest for economic development (Figure 20).

In Brazil, environmental licensing for projects that may affect caves requires prior speleological studies. These studies must

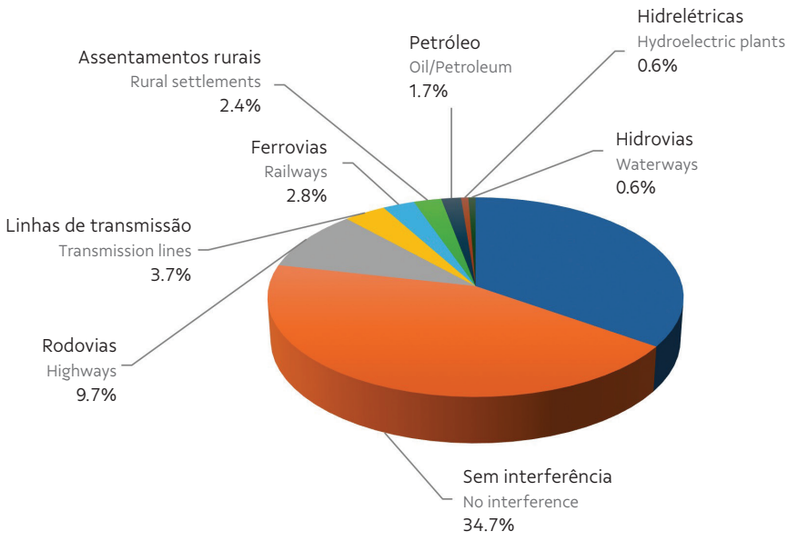


Figura 20: Percentual de cavernas com ocorrência em área de empreendimentos de interesse econômico. Fonte: Modificado do Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2023 – 2024.

Figure 20: Percentage of caves located in areas of projects of economic interest. Source: Modified from Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2023 – 2024.

estudos devem identificar, classificar e avaliar a relevância das cavernas com previsão de impactos potenciais e reais. A classificação da relevância (baixa, média, alta ou máxima) define o grau de proteção legal da cavidade e estabelece os limites para intervenções permitidas (Brasil, 2017; Brasil, 2022).

O monitoramento espeleológico surge como uma etapa posterior, mas essencial dentro desse processo. Ele permite acompanhar, ao longo do tempo, os efeitos das atividades humanas sobre as cavernas. Parâmetros como temperatura, umidade, quantidade e qualidade da água, presença de fauna cavernícola e alterações geomorfológicas são monitorados para detectar impactos e orientar medidas de mitigação e controle para que impactos negativos irreversíveis não aconteçam. Portanto, o monitoramento espeleológico vinculado ao licenciamento ambiental não é apenas uma exigência legal, mas uma ferramenta de gestão ambiental que contribui para a preservação do patrimônio espeleológico. Em tempos de crescente demanda para uso dos recursos naturais, fortalecer a ciência espeleológica e garantir sua aplicação nos processos decisórios é fundamental para assegurar um futuro mais sustentável.

Apesar do aumento do conhecimento sobre as cavernas em rochas ferríferas, o comportamento de seus parâmetros ambientais e ecológicos ao longo do tempo, principalmente em regiões com atividades antrópicas, ainda é incipiente. Comumente, deve ser executado durante a vigência da licença ambiental. Assim, a quantidade de informações geradas nesses programas é imensurável. Porém, normalmente ficam armazenadas dentro dos órgãos ambientais, com os empreendedores e empresas de consultoria, raramente sendo transformadas em conhecimento científico de ampla divulgação. Portanto, este livro irá apresentar a primeira compilação das boas práticas empregadas em programas de monitoramento espeleológico de cavernas ferríferas, tendo como foco os estudos realizados em áreas da Vale S.A. no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais e Serra dos Carajás, estado do Pará. Somadas, essas duas regiões possuem mais de 300 cavernas vem sendo monitoradas há, aproximadamente, 10 anos e de forma padronizada, onde são obtidas informações sobre aspectos geoestruturais, hídricos, sismográficos, climáticos, da qualidade do ar e biológicos.

Por fim, este livro não tem a pretensão de estabelecer dogmas sobre o tema, considerando que o conhecimento acerca das cavernas associadas a formações ferríferas ainda é

identify, classify, and assess the significance of caves, forecasting potential and actual impacts. The relevance classification (low, medium, high, or maximum) determines the degree of legal protection of the cave and establishes the limits for permitted interventions (Brasil, 2017; Brasil, 2022).

Speleological monitoring emerges as a subsequent but essential step within this process. It allows the effects of human activities on caves to be monitored overtime. Parameters such as temperature, humidity, water quantity and quality, the presence of cave fauna, and geomorphological changes are monitored to detect impacts and guide mitigation and control measures to prevent irreversible negative impacts. Therefore, speleological monitoring linked to environmental licensing is not only a legal requirement, but also an environmental management tool that contributes to the preservation of speleological heritage. In times of growing demand for natural resources, strengthening speleological science and ensuring its application in decision-making processes is essential to ensuring a more sustainable future.

Despite the increasing knowledge about ferriferous rock caves, knowledge of the behavior of their environmental and ecological parameters over time, especially in regions with anthropogenic activity, is still incipient. Typically, speleological monitoring must be carried out during the term of the environmental license. Thus, the amount of information generated by these programs is immeasurable. However, it is typically stored within environmental agencies, with developers and consulting firms, and is rarely transformed into widely disseminated scientific knowledge. Therefore, this book will present the first compilation of best practices employed in speleological monitoring programs for ferriferous rock caves, focusing on studies conducted in areas owned by Vale S.A. in the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais, and Serra dos Carajás, state of Pará. Combined, these two regions have over 300 caves that have been monitored in a standardized manner for approximately 10 years, obtaining information on geostructure, hydrology, seismography, climatology, air quality, and biology.

Finally, this book does not intend to establish dogma on the subject, since knowledge about caves associated with ferriferous formations is still recent and constantly evolving.

recente e está em constante evolução. No entanto, representa um primeiro e relevante passo na definição de protocolos para o monitoramento dessas cavernas, contribuindo para harmonizar desenvolvimento econômico e preservação do patrimônio espeleológico brasileiro.

However, it is an relevant first step toward defining protocols for monitoring these caves and contributing to harmonizing economic development and preservation of Brazil's speleological heritage.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AULER, A. S. *et al*. Silica and iron mobilization, cave development and landscape evolution in iron formations in Brazil. **Geomorphology**, v. 398, p. 1–80, 2022. Doi: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108068

AZEVEDO, U. R. *et al*. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. *In*: SCHOBBENHAUS, C.; SILVA, C. R. (org.). **Geoparques do Brasil**: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Cap. 7. p. 183–220.

BERNARDI, L. F. O.; ZAMPAULO, R. A.; OLIVEIRA, M. P. A. A new species of *Neocarus (*Opilioacaridae) from a Brazilian ferruginous geosystem and notes on natural history. **Subterranean Biology**, v. 36, p. 11–33, 2020. DOI: https://doi.org/10.3897/subtbiol.36.54034

BRASIL. Decreto nº 2.486, de 2 de fevereiro de 1998. Cria a Floresta Nacional de Carajás no Estado do Pará, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 fev. 1998.

BRASIL. Decreto s/n, de 13 de outubro de 2014. Dispõe sobre a criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela, localizado nos Municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima, Estado de Minas Gerais. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 out. 2014.

BRASIL. Decreto s/n, de 5 de junho de 2017. Dispõe sobre a criação do Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, localizado nos Municípios de Canaã de Carajás e Parauapebas, Estado do Pará. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 6 jun. 2017.

BRASIL. Portaria IBAMA nº 32 – N, de 30 de março de 1994. Dispõe sobre a criação da Reserva Particular do Patrimônio Natural Santuário Caraça, Estado de Minas Gerais. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 mar. 1994.

BRASIL. Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017. **Diário Oficial da União**, ed. 169, sec. 1, p. 161, 1 set. 2017.

BRASIL. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 jan. 2022.

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.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (org.). **O Vale do Rio Peixe Bravo**: ilhas de ferro no sertão mineiro, Belo Horizonte: 3i Editora, 2017.

CARMO, F. F. Uma prosa sobre as cavernas que trouxeram luz ao conhecimento. *In*: CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (org.). **O Vale do Rio Peixe Bravo**: ilhas de ferro no sertão mineiro, Belo Horizonte: 3i Editora, 2017. p. 28–47.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 36.071, de 27 de setembro de 1994**. Dispõe sobre a criação do Parque Estadual da Serra do Rola-Moça, localizado nos Municípios de Belo Horizonte, Brumadinho, Ibirité e Nova Lima, Minas Gerais. Belo Horizonte, 27 set. 1994. Disponível em: https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/36071/1994/?cons=1. Acesso em: 5 ago. 2025.

PILÓ, L. B.; COELHO, A.; REINO, J. C. R. Geoespeleologia em rochas ferríferas: cenário atual e conservação. *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. 125–148.

PILÓ, L. B; AULER, A. S. Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 92–105, 2005.

RUBBIOLI, E. *et al*. **Cavernas**: Atlas do Brasil Subterrâneo. Brasília. Instituto Chico Mendes da Biodiversidade, 2019.

RUCHKYS, U. A.; TRAVASSOS, L. E. P.; RASTEIRO, M. A.; FARIA, L. E. **Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas**: Propostas para sua conservação do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015.

SOUZA, F. C. R.; CARMO, F. F. Geossistemas ferruginosos do Brasil. *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. 47–76.

TIBBETT, M. Mining in ecologically sensitive landscapes: concepts and challenges. *In*: TIBBETT, M. (ed.). **Mining in ecologically sensitive landscapes**. Clayton: CSIRO Publishing & CRC Press, 2015. p. 3–6.

TOBIAS-JUNIOR, R. Arqueologia no Vale do Rio Peixe Bravo: primeiras abordagens. *In*: CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (org.). **O Vale do Rio Peixe Bravo**: ilhas de ferro no sertão mineiro, Belo Horizonte: 3i Editora, 2017. p. 48–89.



Peropteryx kappleri Peters, 1867
Foto/Photo: Matheus H. Simões



2

Caverna/Cave PDI_0003
Foto/Photo: Ataliba Coelho

Por que monitorar cavernas ferríferas?

GUSTAVO PISA PERRONI
LAÍS FURTADO OLIVEIRA
JULIANA MACARON LONGO RODRIGUES
DANIELA GONÇALVES RODRIGUES DA SILVA

1 CAVERNAS FERRÍFERAS E A RELAÇÃO COM ATIVIDADES ANTRÓPICAS

As cavidades naturais subterrâneas, ou cavernas, esculpidas na matriz rochosa ao longo de milênios pela ação incansável da água e outros processos geológicos, biológicos e químicos, fascinam a humanidade desde a pré-história (Antić; Mayor, 2023; White; Culver, 2012). Mais do que simples espaços vazios, elas são ecossistemas complexos e testemunhas silenciosas do passado, guardando no seu interior registros inestimáveis sobre a vida na Terra (Culver; Pipan, 2019; White, 2007). Em algumas cavernas, é possível encontrar fósseis de animais e plantas, registros paleoclimáticos, além de registros de civilizações antigas, como pinturas, artefatos, objetos cerâmicos e outros vestígios. Preservá-las é essencial para desvendarmos, cada vez mais, os segredos do nosso planeta e compreendermos as mudanças pelas quais ele passou e está passando (Mammola *et al.* 2019).

Esses ambientes possuem características peculiares quando comparados aos ambientes de superfície, como a ausência de luz e a estabilidade climática, que favorecem a evolução de espécies adaptadas a condições extremas (Culver; Pipan, 2019; Souza-Silva *et al.* 2011). Além disso, oferecem condições propícias para a preservação de registros paleontológicos, arqueológicos e geológicos (O'Connor; Lord, 2013). No entanto, apesar de sua importância, o conhecimento sobre sua biodiversidade, dinâmicas ecológica e geológica, por exemplo, ainda é limitado, o que reforça a necessidade de pesquisas mais aprofundadas.

Devido à importância desses ambientes, as cavernas são reconhecidas como patrimônio ambiental e cultural brasileiro, conforme a Constituição Federal e outros dispositivos legais. Esses ambientes são parte integrante da cultura humana há milênios. Desde a pré-história, serviram como abrigo e fonte de recursos para diversas civilizações (Antić; Mayor, 2023). Hoje, além de seu valor científico e turístico, muitas cavernas estão situadas em áreas de grande interesse econômico, especialmente aquelas desenvolvidas em rochas ferruginosas, que concentram grandes reservas minerais. Esse cenário é particularmente relevante nos estados de Minas Gerais (MG) e Pará (PA), conforme ilustrado na Figura 1.

| Why monitor ferriferous caves?

GUSTAVO PISA PERRONI
LAÍS FURTADO OLIVEIRA
JULIANA MACARON LONGO RODRIGUES
DANIELA GONÇALVES RODRIGUES DA SILVA

1 FERRIFEROUS CAVES AND THEIR RELATIONSHIP WITH ANTHROPIC ACTIVITIES

Natural subterranean cavities, or caves, carved into the rock matrix over millennia by the tireless action of water and other geological, biological and chemical processes, have fascinated humanity since prehistoric times (Antić; Mayor, 2023; White; Culver, 2012). More than just empty spaces, they are complex ecosystems and silent witnesses of the past, holding invaluable records of life on Earth (Culver; Pipan, 2019; White, 2007). In some caves it is possible to find fossils of animals and plants, paleoclimatic records, as well as records of ancient civilizations, such as paintings, artifacts, ceramic objects and other remains. Preserving caves is essential to increasingly unravel the secrets of our planet and understand the changes it has undergone and is undergoing (Mammola *et al.* 2019).

These environments have peculiar characteristics when compared to surface environments, such as climatic stability and the absence of light, which favor the evolution of species adapted to extreme conditions (Culver; Pipan, 2019; Souza-Silva *et al.* 2011). In addition, it provides favorable conditions for the preservation of paleontological, archaeological and geological records (O'Connor; Lord, 2013). However, despite their importance, knowledge about cave biodiversity and ecological and geological dynamics, for example, is still limited, which reinforces the need for more in-depth research.

Due to the importance of these environments, caves are recognized as Brazilian environmental and cultural heritage, according to the Constituição Federal and other legal provisions. These environments have been an integral part of human culture for millennia. Since prehistoric times, they have served as shelter and a source of resources for various civilizations (Antić; Mayor, 2023). Today, in addition to their scientific and touristic value, many caves are located in areas of great economic interest, especially those developed in ferruginous rocks, which concentrate large mineral reserves. This scenario is particularly relevant in the states of Minas Gerais (MG) and Pará (PA), as illustrated in Figure 1.

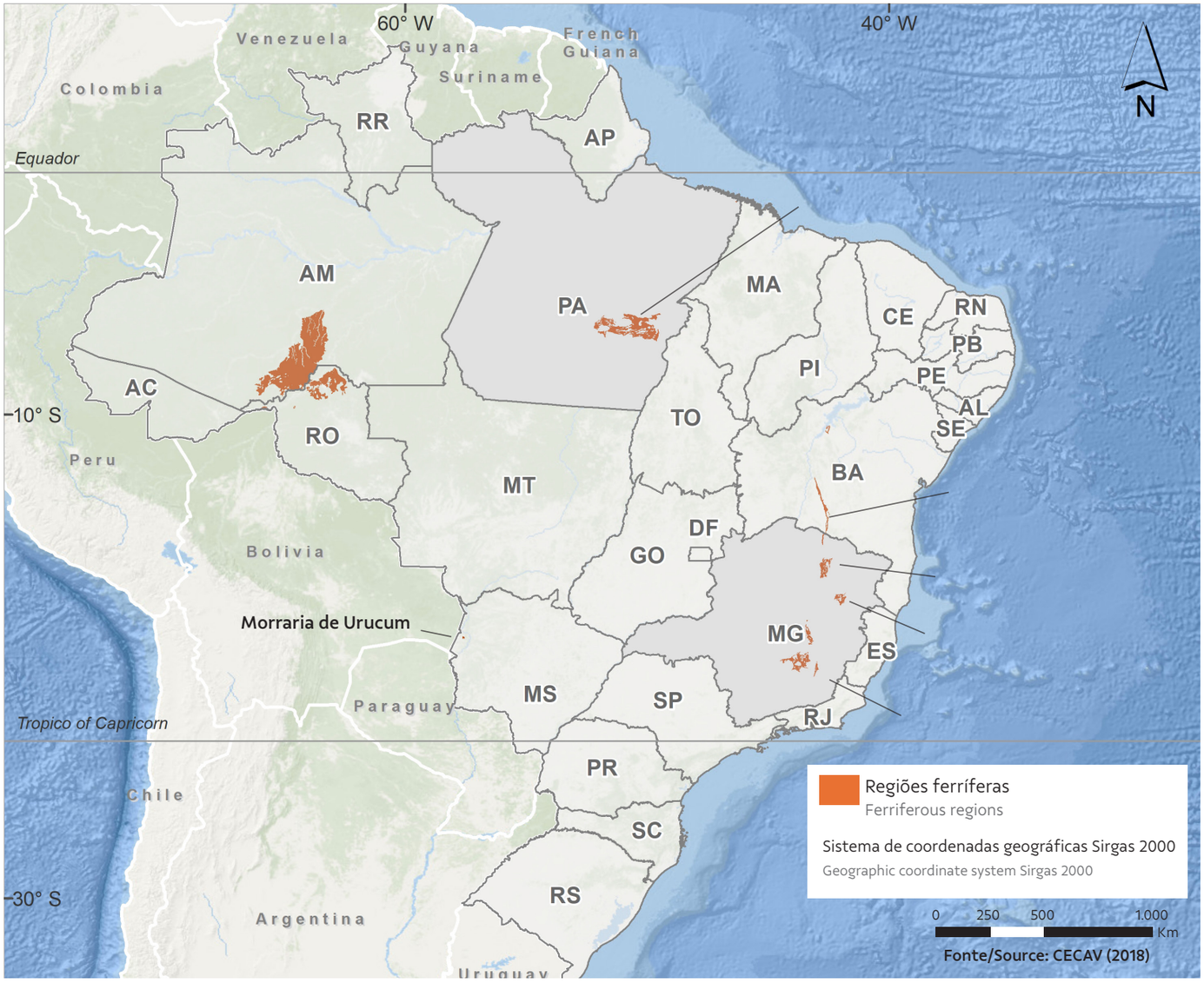


Figura 1: Localização das principais regiões ferríferas no Brasil, com destaque para os estados de Minas Gerais (MG) e Pará (PA). (Elaborado por: Fádua Oliveira)

Figure 1: Locations of the main iron-bearing regions in Brazil, emphasizing the states of Minas Gerais (MG) and Pará (PA). (Prepared by: Fádua Oliveira)

O alto valor econômico das rochas ferruginosas impulsionou a exploração mineral, que, ao mesmo tempo em que fomentou estudos espeleológicos e avanços científicos, gerou impactos ambientais significativos (Auler; Piló, 2005; Ferreira, 2005). A mineração, um dos pilares da economia brasileira, tem sido historicamente um dos principais vetores de transformação das paisagens subterrâneas e superficiais desde o século XVIII

The high economic value of ferruginous rock has driven mineral exploration, which, while fostering speleological studies and scientific advances, has generated significant environmental impacts (Auler; Piló, 2005; Ferreira, 2005). Mining, one of the pillars of the Brazilian economy, has been one of the main agents of transformation of subterranean and surface landscapes since

(Ruchkys *et al.*, 2015). Segundo a base de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, o Brasil possui ao menos 30 mil cavernas cadastradas (ICMBio/CECAV, 2025, Figura 2), das quais 3.060 ocorrem em formações ferruginosas e mais de 10.000 encontram-se dentro de áreas de mineração (ICMBio/CECAV, 2023). Esse panorama evidencia a necessidade urgente de equilibrar o aproveitamento econômico com a conservação dos ecossistemas subterrâneos. De fato, empreendimentos em áreas com potencial espeleológico elevado passam por inúmeros desafios, principalmente os voltados à mineração, uma vez que o produto base de exploração é a própria rocha onde as cavernas são formadas.

Embora historicamente menos estudadas do que as cavernas calcárias, nos últimos 20 anos as cavernas ferruginosas revelaram uma biodiversidade única e uma geologia singular, tornando-se cada vez mais relevantes no contexto ambiental (Ferreira, 2005; Parker, 2013; Pilo *et al.*, 2023; Souza-Silva *et al.*, 2011). Compreender os efeitos das atividades antrópicas sobre os ecossistemas cavernícolas é essencial para a formulação de estratégias eficazes de proteção e conservação desses ambientes singulares. Nesse contexto, o monitoramento ambiental surge como uma ferramenta indispensável, ao permitir a avaliação contínua dos impactos gerados e subsidiar a adoção de medidas corretivas e/ou preventivas. Além disso, fornece subsídios técnicos e científicos para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação, assegurando que a exploração de recursos naturais ocorra de forma responsável e em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável.

2 MONITORAMENTO AMBIENTAL EM CAVERNAS E A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No Brasil, as cavernas são reconhecidas como bens da União, o que impõe ao Poder Público e à sociedade o dever de defendê-las e preservá-las para as presentes e futuras gerações. Nesse contexto, os primeiros monitoramentos ambientais em cavernas foram historicamente aplicados ao espeleoturismo, com maior ênfase nos riscos à segurança dos visitantes, em vez dos impactos que a visitação poderia gerar nos próprios ambientes cavernícolas (Lobo; Moretti, 2009). Assim, as primeiras coletas de dados, com recorrência de monitoramentos, ocorreram dentro desse contexto antropocêntrico.

Com a evolução no entendimento da questão ambiental, especialmente após a Conferência Rio-92, novas abordagens começaram a surgir, com foco na identificação dos impactos

the 18th century (Ruchkys *et al.*, 2015). According to the database of the Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), there are at least 30 thousand registered caves in Brazil (ICMBio/CECAV, 2025; Figure 2), of which 3,060 occur in ferruginous formations and more than 10,000 within mining areas (ICMBio/CECAV, 2023). This panorama highlights the urgent need to balance economic exploitation with the conservation of subterranean ecosystems. In fact, ventures in areas with high speleological potential face numerous challenges, especially those related to mining, since the base product of exploitation is the rock itself in which the caves are formed.

Although historically less studied than limestone caves, the last 20 years have seen ferruginous caves reveal a unique biodiversity and a singular geology, making them increasingly relevant in the environmental context (Ferreira, 2005; Parker, 2013; Pilo *et al.*, 2023; Souza-Silva *et al.*, 2011). In order to plan effective strategies for the protection and conservation of these unique environments, it is essential to understand the effects of anthropogenic activities on cave ecosystems. In this regard, environmental monitoring is crucial, as it enables continuous assessment of impacts and supports the implementation of corrective and/or preventive measures. Furthermore, provides the technical and scientific basis for formulating public policies aimed at conservation, ensuring that the exploitation of natural resources is carried out responsibly and sustainably.

2 ENVIRONMENTAL MONITORING IN CAVES AND BRAZILIAN LEGISLATION

Brazilian caves are recognized as federal assets, which imposes on the government and society the duty to defend and preserve them for present and future generations. In this context, the first environmental monitoring in Brazilian caves was applied to speleotourism, with greater emphasis on risks to visitor safety, rather than on the impacts that visitation could generate in the cave environments themselves (Lobo; Moretti, 2009). Thus, the first collections of data, with recurring monitoring, occurred within this anthropocentric context.

With the evolution of the understanding of environmental issues, especially after the Rio-92 Conference, new approaches began to emerge that focused on identifying the impacts of

da visitação nas cavernas abertas ao espeleoturismo. Nesse cenário, a atividade turística em cavernas passou a depender da aprovação de um Plano de Manejo Espeleológico, sendo essa uma das principais medidas para proteger o patrimônio espeleológico.

Mais recentemente, com a alteração do Decreto Federal nº 99.556/1990 pelo Decreto Federal nº 6.640/2008 e revogação parcial pelo Decreto Federal nº 10.935/2022, a questão das visits to caves open to speleotourism. Under this scenario, tourism activities in caves became dependent on the approval of a Speleological Management Plan, which is one of the main measures to protect speleological heritage.

More recently, with the amendment of Federal Decree 99,556/1990 by Federal Decree 6,640/2008, and its partial repeal by Federal Decree 10,935/2022, the issue of caves has been given

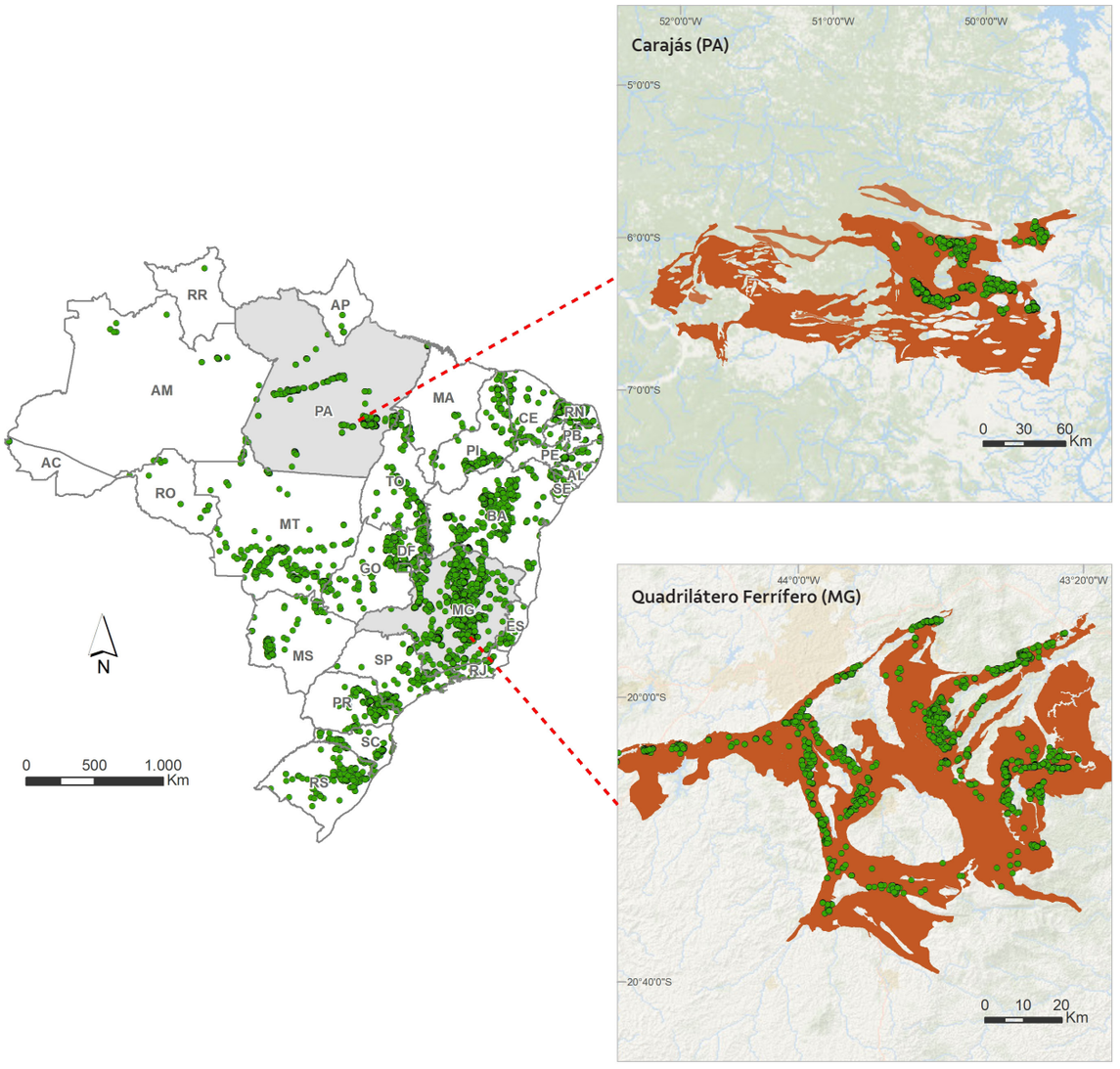


Figura 2: Localização das cavernas cadastradas no Brasil. Detalhe da quantidade de cavernas identificadas na região ferrífera de Carajás (PA) e Quadrilátero Ferrífero (MG). (Elaborado por: Fádua Oliveira)

Figure 2: Locations of registered caves in Brazil. Detail of the number of caves identified in the iron-bearing regions of Carajás (PA) and the Iron Quadrangle (MG). (Prepared by: Fádua Oliveira)

cavernas foi reconhecida com maior atenção, especialmente devido ao risco de impactos irreversíveis nas cavernas. A temática espeleológica passou a ser integrada aos programas de monitoramento no processo de licenciamento ambiental, um procedimento administrativo no qual o poder público analisa e autoriza a implantação, ampliação ou operação de empreendimentos e atividades que possam causar impactos ao meio ambiente. Vale destacar que, enquanto outras questões ambientais passaram a ser monitoradas desde a década de 1980 (Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama 01/1986), as cavernas começaram a ser objeto de monitoramento apenas após a publicação do Decreto Federal nº 6.640 em 2008.

Dentro desse contexto, o licenciamento ambiental assume um papel crucial ao buscar o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e social e a preservação do meio ambiente. Através desse processo, é possível garantir o usufruto sustentável dos recursos naturais, assegurando benefícios para o presente e o futuro, conforme o arcabouço legal brasileiro.

No Brasil, diversas normas jurídicas e regulamentos tratam da proteção das cavernas, orientando a preservação, a utilização responsável e a elaboração de estudos espeleológicos. A seguir, apresentamos uma síntese das principais normas vigentes sobre a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro no contexto do licenciamento ambiental (no âmbito federal).

De modo complementar, o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (Cecav), autarquia federal vinculada ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), tem a missão de proteger, gerenciar e expandir o conhecimento sobre as cavernas no território nacional. O Cecav também publica diretrizes e orientações técnicas para as atividades, etapas e estudos espeleológicos necessários no processo de licenciamento ambiental. No entanto, é importante destacar que algumas dessas diretrizes são instrumentos orientadores, e não normativos.

3 MONITORAMENTO AMBIENTAL: CONCEITOS E APLICAÇÕES

O monitoramento ambiental consiste no processo sistemático e contínuo de coleta, estudo e acompanhamento de variáveis ambientais pré-selecionadas. Seu objetivo é identificar e avaliar, tanto quantitativa quanto qualitativamente, as condições ambientais de uma determinada região em um dado momento, bem como a evolução dessas condições ao longo do tempo (ICMBio/CECAV, 2022a; Paraná, 2022). Essa abordagem permite detectar tendências e possíveis impactos, contribuindo para a prevenção da degradação ambiental (Magnusson, 2013; Sánchez, 2013).

greater attention, especially due to the risk of irreversible impacts. The speleological issue began to be integrated into monitoring programs in the environmental licensing process, an administrative procedure in which the government analyzes and authorizes the implementation, expansion or operation of projects and activities that may cause impacts to the environment. It is worth noting that, while other environmental issues began to be monitored in the 1980s (Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama 01/1986), caves began to be the object of monitoring only after the publication of Federal Decree 6,640 in 2008.

Environmental licensing plays a crucial role within this context by seeking a balance between economic and social development and environmental preservation. This process makes it possible to guarantee the sustainable use of natural resources, thereby ensuring benefits for the present and future, in accordance with the Brazilian legal framework.

Several legal norms and regulations deal with the protection of Brazilian caves, and guide their preservation and responsible use, as well as the preparation of speleological studies. Below, we present a summary of the main current regulations for the protection of Brazil's speleological heritage in the context of environmental licensing (at the federal level).

In addition, the Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (Cecav), a federal agency linked to the Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), has the mission of protecting, managing and expanding knowledge about caves in the country. Cecav also publishes guidelines and technical guidance for the activities, stages and speleological studies required in the environmental licensing process. However, it is important to highlight that some of these guidelines are guiding instruments and not regulatory.

3 ENVIRONMENTAL MONITORING: CONCEPTS AND APPLICATIONS

Environmental monitoring consists of the systematic and continuous process of collecting, studying and monitoring pre-selected environmental variables. Its objective is to identify and evaluate, both quantitatively and qualitatively, the environmental conditions of a given region at a given time, as well as the evolution of these conditions over time (ICMBio/CECAV, 2022a; Paraná, 2022). This approach allows the detection of trends and possible impacts, thereby contributing to the prevention of environmental degradation (Magnusson, 2013; Sánchez, 2013).

O acompanhamento da evolução de parâmetros ambientais pode ter diferentes propósitos. Em alguns casos, busca-se compreender a dinâmica natural de um ecossistema ou elemento ambiental específico. No entanto, na maioria das situações, o monitoramento está diretamente ligado à necessidade de avaliar os impactos decorrentes de atividades humanas. Dessa forma, existe uma relação estreita entre os parâmetros monitorados e os potenciais impactos previamente identificados em avaliações ambientais, ainda que o processo não esteja formalmente inserido em um licenciamento ambiental (Da Cunha *et al.*, 2014; Magnusson 2013).

O monitoramento ambiental pode ser realizado com diferentes finalidades, sendo geralmente categorizado em duas abordagens principais: o monitoramento acadêmico e o monitoramento voltado ao cumprimento de condicionantes do licenciamento ambiental (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; De Almeida, 2023; ICMBio/CECAV, 2022a).

De acordo com Likens (2012) o monitoramento acadêmico tem como objetivo a produção de conhecimento científico sobre processos naturais e os impactos ambientais causados por atividades antrópicas ou mudanças ambientais. Esse tipo de monitoramento é geralmente conduzido por instituições de ensino e pesquisa, com foco em estudos exploratórios ou de longo prazo. Os dados obtidos auxiliam no desenvolvimento de modelos ecológicos, identificação de padrões ambientais e elaboração de estratégias de conservação.

Já o monitoramento vinculado ao licenciamento ambiental possui uma aplicação prática e objetiva, sendo realizado para atender às exigências legais estabelecidas pelos órgãos ambientais no contexto de empreendimentos potencialmente impactantes. Seu propósito é garantir que as medidas de controle, mitigação e compensação ambiental sejam eficazes, assegurando que as atividades desenvolvidas não comprometam a integridade dos ecossistemas afetados. Esse tipo de monitoramento é essencial em setores como a mineração, onde o acompanhamento de indicadores ambientais é obrigatório (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; De Almeida, 2023).

Embora tenham propósitos distintos, essas duas abordagens se complementam. O monitoramento acadêmico fornece uma base científica para os estudos aplicados ao licenciamento ambiental, enriquecendo as análises e estratégias de mitigação. Ao mesmo tempo, os dados gerados pelo monitoramento do licenciamento podem revelar lacunas no conhecimento, impulsionando novas pesquisas acadêmicas.

Monitoring the evolution of environmental parameters can have different purposes. In some cases, the aim is to understand the natural dynamics of a specific ecosystem or environmental element. However, in most situations, monitoring is directly linked to the need to assess the impacts resulting from human activities. Thus, there is a close relationship between the monitored parameters and the potential impacts previously identified in environmental assessments, even if the process is not formally included in an environmental licensing process (Da Cunha *et al.*, 2014; Magnusson 2013).

Environmental monitoring can be carried out for different purposes and is generally categorized into two main approaches: academic monitoring and monitoring aimed at complying with environmental licensing conditions (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; De Almeida, 2023; ICMBio/CECAV, 2022a).

According to Likens (2012) academic monitoring aims to produce scientific knowledge about natural processes and the environmental impacts caused by human activities or environmental changes. This type of monitoring is generally conducted by educational and research institutions, focusing on exploratory or long-term studies. The data obtained assist in the development of ecological models, the identification of environmental patterns and the establishment of conservation strategies.

Monitoring linked to environmental licensing has a practical and objective application and is carried out to meet the legal requirements established by environmental agencies in the context of potentially impactful projects. Its purpose is to ensure that environmental control, mitigation and compensation measures are effective, so that the activities developed do not compromise the integrity of the affected ecosystems. This type of monitoring is essential in sectors such as mining, where monitoring environmental indicators is mandatory (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; De Almeida, 2023).

Although they have different purposes, these two approaches complement each other. Academic monitoring provides a scientific basis for studies applied to environmental licensing, thereby enriching analyses and mitigation strategies. At the same time, the data generated by licensing monitoring can reveal knowledge gaps that drive new academic research.

INSTRUMENTOS NORMATIVOS VIGENTES CURRENT REGULATORY INSTRUMENTOS

23/01/1986

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001

Define responsabilidades, critérios e diretrizes para a implementação da Avaliação de Impactos Ambientais como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente. No Art. 6º, estabelece as atividades mínimas para o estudo de impacto ambiental, destacando o inciso IV, que exige a elaboração de um programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos, incluindo fatores e parâmetros a serem considerados.

05/10/1988

CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Reconhece as cavernas como bens da União e impõe ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-las e preservá-las para as presentes e futuras gerações.

15/06/1990

PORTARIA IBAMA Nº 887

Estabelece conceitos básicos e torna obrigatória a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para empreendimentos em áreas com cavernas ou potencial espeleológico que possam causar impactos diretos ou indiretos a essas cavidades.

1

2

3

23 January 1986

CONAMA RESOLUTION Nº 001

Defines the responsibilities, criteria and guidelines for the implementation of the Environmental Impact Assessment as an instrument of the National Environmental Policy. In Art. 6, it establishes the minimum activities for an environmental impact study, highlighting Item IV, which requires the preparation of a program for tracking and monitoring impacts, including the factors and parameters to be considered.

05 October 1988

CONSTITUTION OF THE FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL

Recognizes caves as assets of the Union and imposes on Public Authorities and the community the duty to defend and preserve them for present and future generations.

15 June 1990

IBAMA ORDINANCE Nº 887

Establishes basic concepts and makes the preparation of an Environmental Impact Study (EIS) mandatory for projects in areas with caves or speleological potential that may cause direct or indirect impacts to them.

01/10/1990
07/11/2008

DECRETO FEDERAL Nº 99.556 modificado pelo DECRETO FEDERAL Nº 6.640

Proteção das Cavernas: Classifica as cavernas de acordo com sua relevância (máxima, alta, média ou baixa) com base em atributos ecológicos, biológicos e geológicos, entre outros. Estabelece que apenas cavernas de grau máximo de relevância são protegidas de impactos irreversíveis e introduz formas de compensação para danos ambientais ao patrimônio espeleológico. Com o advento do Decreto Federal nº 10.935/2022, atualmente está parcialmente vigente.

05/06/1997

PORTARIA IBAMA Nº 57

Institui o "Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas (Cecav)", que tem como finalidade propor, normatizar, fiscalizar e controlar o uso do patrimônio espeleológico brasileiro, bem como fomentar levantamentos, estudos e pesquisas que possibilitem ampliar o conhecimento sobre as cavernas existentes no território nacional.

10/09/2004

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 347

Regulamenta o licenciamento ambiental de atividades que possam degradar o patrimônio espeleológico, incluindo conceitos como área de influência, plano de manejo espeleológico e procedimentos para autorizar atividades turísticas e científicas. Cria também o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (Canie).

4

5

6

01 October 1990
07 November 2008

FEDERAL DECREE Nº 99,556
Modified by FEDERAL DECREE Nº 6,640

Cave Protection: Classifies caves according to their relevance (maximum, high, medium or low) based on ecological, biological and geological attributes, among others. Establishes that only caves of maximum relevance are to be protected from irreversible impacts and introduces forms of compensation for environmental damage to speleological heritage. With the advent of Federal Decree 10,935/2022, it is currently partially in force.

05 June 1997

IBAMA ORDINANCE Nº 57

Establishes the "Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas (Cecav)", which aims to propose, regulate, supervise and control the use of Brazilian speleological heritage, as well as to encourage surveys, studies and research that make it possible to expand knowledge about caves existing in the national territory.

10 September 2004

CONAMA RESOLUTION Nº 347

Regulates the environmental licensing of activities that may degrade speleological heritage, including concepts such as area of influence, speleological management plan and procedures for authorizing touristic and scientific activities. It also creates the Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE).

28/08/2007

LEI FEDERAL Nº 11.516

Cria o ICMBio, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), com a missão de executar ações de preservação, pesquisa e conservação da biodiversidade, implementar a política nacional de unidades de conservação, e atuar na fiscalização e proteção ambiental das unidades de conservação federais.

30/09/2009

PORTARIA MMA Nº 358

Institui o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico com o objetivo de desenvolver estratégias para a conservação e uso sustentável do patrimônio espeleológico brasileiro. Estabelece seis componentes principais: conhecimento, conservação, utilização sustentável, monitoramento, avaliação, prevenção e mitigação de impactos, divulgação e fortalecimento institucional.

24/01/2017
20/10/2017

INSTRUÇÃO NORMATIVA ICMBio Nº 01
INSTRUÇÃO NORMATIVA ICMBio Nº 04

Estabelece procedimentos para definir formas alternativas de compensação para impactos negativos irreversíveis em cavernas com grau de relevância alto. Acrescenta o Art. 5-A à Instrução Normativa nº 01/2017, detalhando essas medidas compensatórias.

7 8 9

28 August 2007

FEDERAL LAW Nº 11,516

Creates ICMBio, linked to the Ministério do Meio Ambiente (MMA), with the mission of carrying out actions for the preservation, research and conservation of biodiversity, implementing the national policy for conservation units, and acting in the inspection and environmental protection of federal conservation units.

30 September 2009

MMA ORDINANCE Nº 358

Institutes the Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico with the objective of developing strategies for the conservation and sustainable use of Brazilian speleological heritage. It establishes six main components: knowledge, conservation, sustainable use, monitoring, assessment, prevention and mitigation of impacts, dissemination and institutional strengthening.

24 January 2017
20 October 2017

ICMBio REGULATORY INSTRUCTION Nº 01
ICMBio REGULATORY INSTRUCTION Nº 04

Establishes procedures to define alternative forms of compensation for irreversible negative impacts to caves with a high degree of relevance. Adds Art. 5-A to Regulatory Instruction Nº 01/2017, detailing these compensatory measures.

30/08/2017

INSTRUÇÃO NORMATIVA MMA Nº 02

Estabelece a metodologia para classificar o grau de relevância das cavernas (máximo, alto, médio ou baixo), com base nos atributos e variáveis do Anexo I, avaliados sob enfoque local e regional. Regula também o Art. 5º do Decreto nº 6.640/2008, definindo os investimentos no Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, conforme o grau de impacto causado pelo empreendimento.

27/09/2019

INSTRUÇÃO NORMATIVA CONJUNTA MMA/ICMBio Nº 8

Estabelece os procedimentos de licenciamento ambiental para atividades que impactem cavernas em unidades de conservação federais, sob a autorização ou ciência do ICMBio e Ibama. O Art. 14, inciso V, destaca a exigência do programa de monitoramento para cavidades com grau de relevância máximo, como parte dos estudos ambientais espeleológicos específicos a serem realizados nos processos de licenciamento.

12/01/2022

DECRETO FEDERAL Nº 10.935

Concede a nova versão regulamentar que dispõe sobre a proteção de cavernas existentes no território nacional e revoga o Decreto Federal nº 99.556/1990. Dentre as alterações dadas por esse decreto destaca-se a autorização para impactos negativos irreversíveis sobre cavidades naturais de máxima relevância pelo órgão ambiental licenciador competente, no âmbito do licenciamento ambiental da atividade ou do empreendimento, dentro de certas condições. Contudo, até o presente momento, este decreto está parcialmente suspenso pela ADPF 935 MC/DF (2022) no que tange a possibilidade de impactos irreversíveis em cavernas de máxima relevância e sua área de influência. Por este motivo, temos três decretos federais parcialmente em vigor e sem a devida regulamentação.

10

11

12

30 August 2017

MMA REGULATORY INSTRUCTION Nº 02

Establishes the methodology for classifying the degree of relevance of caves (maximum, high, medium or low), based on the attributes and variables of Annex I, assessed from a local and regional perspectives. Also regulates Article 5 of Decree Nº. 6,640/2008, defining investments in the Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, according to the degree of impact caused by the project.

27 September 2019

MMA/ICMBio JOINT REGULATORY INSTRUCTION Nº 8

Establishes environmental licensing procedures for activities that impact caves in federal conservation units, with the authorization or knowledge of ICMBio and Ibama. Art. 14, Item V, highlights the requirement for a monitoring program for caves of maximum relevance, as part of the specific speleological environmental studies to be carried out in the licensing processes.

12 January 2022

FEDERAL DECREE Nº 10,935

Grants the new regulatory version that provides for the protection of caves existing in the national territory and repeals Federal Decree Nº. 99,556/1990. Among the changes made by this decree, the authorization for irreversible negative impacts on natural caves of maximum relevance by the competent environmental licensing agency stands out, within the scope of the environmental licensing of the activity or enterprise, under certain conditions. However, to date, this decree has been partially suspended by ADPF 935 MC/DF (2022) regarding the possibility of irreversible impacts on caves of maximum relevance and their area of influence. For this reason, we have three federal decrees partially in force and without due regulation.

Por fim, é essencial diferenciar o monitoramento ambiental realizado no âmbito do licenciamento daquele voltado à avaliação geral da qualidade ambiental, conduzido por órgãos governamentais. Enquanto este último visa acompanhar tendências ambientais de maneira ampla, o monitoramento no contexto do licenciamento deve ser estruturado com base nos impactos previstos para um empreendimento específico, permitindo distinguir as alterações induzidas por suas atividades de outras variações naturais ou antropogênicas (Resolução CONAMA nº 1, 1986). Nesse contexto, uma avaliação de impactos ambientais bem conduzida é fundamental para a formulação de um programa de monitoramento ambiental eficaz e orientado à conservação dos ecossistemas afetados.

Histórico, Boas Práticas e Relação com Licenciamento Ambiental

O acompanhamento da qualidade ambiental (monitoramento) é previsto na Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), desde sua primeira versão – publicada em 31 de agosto de 1981, por meio da lei federal 6.938 – diretamente, em seu princípio VII: *"acompanhamento do estado da qualidade ambiental"*; indiretamente, em diversos outros pontos da Política.

Finally, it is essential to differentiate between environmental monitoring carried out within the scope of licensing and that aimed at the general assessment of environmental quality conducted by government agencies. While the latter aims to monitor environmental trends in a broad manner, monitoring in the context of licensing should be structured based on the impacts expected for a specific project, allowing changes induced by its activities to be distinguished from other natural or anthropogenic variations (CONAMA Resolution No. 1, 1986). In this context, a well-conducted environmental impact assessment is essential for the formulation of an effective environmental monitoring program geared towards conservation of the affected ecosystems.

History, Best Practices and Relationship with Environmental Licensing

Monitoring of environmental quality is provided for in the Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), since its first version – published on August 31, 1981, through Federal Law 6,938 – directly by principle VII: "*monitoring of the state of environmental quality*"; and indirectly by several other points of the policy.

Política Nacional de Meio Ambiente
(Lei 6.938/1981 e suas alterações)

Princípios

- ação governamental na manutenção do equilíbrio ecológico, considerando o meio ambiente como um patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido, tendo em vista o uso coletivo;
- racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar;
- planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais;
- proteção dos ecossistemas, com a preservação de áreas representativas;
- controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras;
- incentivos ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais;
- acompanhamento do estado da qualidade ambiental;
- recuperação de áreas degradadas;
- proteção de áreas ameaçadas de degradação;
- educação ambiental para todos os níveis de ensino, inclusive a educação da comunidade, objetivando capacitá-la para participação ativa na defesa do meio ambiente.

Política Nacional de Meio Ambiente
(Law 6,938/1981 and its alterations)

Principles

- government action in maintaining ecological balance, considering the environment as a public asset to be necessarily ensured and protected, with a view to collective use;
- rationalization of the use of land, subsoil, water and air;
- planning and monitoring the use of environmental resources;
- protection of ecosystems, with the preservation of representative areas;
- control and zoning of potentially or effectively polluting activities;
- incentives for the study and research of technologies aimed at the rational use and protection of environmental resources;
- monitoring of the state of environmental quality;
- recovery of degraded areas;
- protection of areas threatened with degradation;
- environmental education for all levels of instruction, including community education, aiming to enable it to actively participate in the defense of the environment.

Conceitos

- **meio ambiente:** o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas;
- **degradação da qualidade ambiental:** a alteração adversa das características do meio ambiente;
- **poluição:** a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos;
- **poluidor:** a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental;
- **recursos ambientais**: a atmosfera, as águas interiores, superficiais e subterrâneas, os estuários, o mar territorial, o solo, o subsolo, os elementos da biosfera, a fauna e a flora.

Objetivos

- compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e o equilíbrio ecológico;
- definição de áreas prioritárias de ação governamental relativa à qualidade e ao equilíbrio ecológico, atendendo aos interesses da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios;
- estabelecimento de critérios e padrões de qualidade ambiental e de normas relativas ao uso e manejo de recursos ambientais;
- desenvolvimento de pesquisas e de tecnologias nacionais orientadas para o uso racional de recursos ambientais;
- difusão de tecnologias de manejo do meio ambiente, divulgação de dados e informações ambientais e a formação de uma consciência pública sobre a necessidade de preservação da qualidade ambiental e do equilíbrio ecológico;
- preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida;
- imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos.

Concepts

- **environment:** the set of conditions, laws, influences and interactions of a physical, chemical and biological nature, which allows, shelters and governs life in all its forms;
- **degradation of environmental quality:** the adverse alteration of the characteristics of the environment;
- **pollution:** the degradation of environmental quality resulting from activities that directly or indirectly: a) harm the health, safety and well-being of the population; b) create conditions that are adverse to social and economic activities; c) adversely affect the biota; d) affect the aesthetic or sanitary conditions of the environment; e) release materials or energy that do not comply with established environmental standards;
- polluter: a natural or legal person, under public or private law, responsible, directly or indirectly, for an activity that causes environmental degradation;
- environmental resources: the atmosphere, inland, surface and underground waters, estuaries, territorial sea, soil, subsoil, elements of the biosphere, fauna and flora.

Objectives

- compatibility of economic and social development with the preservation of environmental quality and ecological balance;
- definition of priority areas for government action regarding quality and ecological balance, meeting the interests of the Union, States, Federal District, Territories and Municipalities;
- establishment of criteria and standards of environmental quality and standards relating to the use and management of environmental resources;
- development of national research and technologies aimed at the rational use of environmental resources;
- dissemination of environmental management technologies, disclosure of environmental data and information and the formation of public awareness about the need to preserve environmental quality and ecological balance;
- preservation and restoration of environmental resources with a view to their rational use and permanent availability, contributing to the maintenance of ecological balance conducive to life;
- imposition on the polluter and predator the obligation to recover and/or compensate for the damage caused and, on the user, the contribution for the use of environmental resources for economic purposes.

Instrumentos

- o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental;
- o zoneamento ambiental;
- a avaliação de impactos ambientais;
- o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras;
- os incentivos à produção e instalação de equipamentos e a criação ou absorção de tecnologia, voltados para a melhoria da qualidade ambiental;
- a criação de reservas e estações ecológicas, áreas de proteção ambiental e as de relevante interesse ecológico, pelo Poder Público Federal, Estadual e Municipal;
- a criação de espaços territoriais, especialmente os protegidos pelo Poder Público Federal, Estadual e Municipal, tais como áreas de proteção ambiental de relevante interesse ecológico e as reservas extrativistas;
- o sistema nacional de informações sobre o meio ambiente;
- o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- as penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental.
- a instituição do Relatório de Qualidade do Meio Ambiente, a ser divulgado anualmente pelo IBAMA;
- a garantia da prestação de informações relativas ao Meio Ambiente, obrigando o Poder Público a produzi-las, quando inexistentes;
- o Cadastro Técnico Federal de atividades potencialmente poluidoras e/ou utilizadoras dos recursos ambientais.
- instrumentos econômicos, como concessão florestal, servidão ambiental, seguro ambiental e outros.

As ações de monitoramento ambiental estão, frequentemente, associadas às fases de implantação e operação dos empreendimentos. Nesse contexto, a seleção dos parâmetros de monitoramento é focada, principalmente, na detecção de alterações decorrentes dos aspectos e impactos identificados na fase de avaliação da viabilidade ambiental. Entretanto, as primeiras medições podem ser coletadas já na fase de avaliação ambiental, anterior à obtenção da Licença Prévia (LP) do empreendimento. Isso ocorre porque, para que seja possível detectar mudanças nos parâmetros ambientais selecionados, é essencial registrar as condições iniciais ou naturais, conhecidas como "condições de *baseline*" ou "*background*" (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; Bjorkland, 2013; De Almeida, 2023).

Instruments

- the establishment of environmental quality standards;
- environmental zoning;
- environmental impact assessment;
- the licensing and review of actually or potentially polluting activities;
- incentives for the production and installation of equipment and the creation or absorption of technology, aimed at improving environmental quality;
- the creation of ecological reserves and stations, environmental protection areas and those of relevant ecological interest, by Federal, State and Municipal Public Authorities;
- the creation of territorial spaces, especially those protected by Federal, State and Municipal Public Authorities, such as environmental protection areas of relevant ecological interest and extractive reserves;
- the national environmental information system;
- the Federal Technical Register of Environmental Defense Activities and Instruments;
- disciplinary or compensatory penalties for failure to comply with the measures necessary to preserve or correct environmental degradation.
- the establishment of the Environmental Quality Report, to be published annually by IBAMA;
- the guarantee of the provision of information related to the environment, obliging the Public Authorities to produce it, when it does not exist;
- the Federal Technical Registry polluting activities and/or users of environmental resources;
- economic instruments, such as forest concession, environmental easement, environmental insurance and others.

Environmental monitoring actions are often associated with the implementation and operation phases of projects. In this context, the selection of monitoring parameters is mainly focused on detecting changes resulting from the aspects and impacts identified in the environmental feasibility assessment phase. However, the first measurements can be collected as early as the environmental assessment phase, prior to obtaining the Preliminary License (PL) for the project. This is because, in order to detect changes in the selected environmental parameters, it is essential to record the initial or natural conditions, known as "*baseline*" or "*background*" conditions (Appiah-Opoku; Bryan, 2013; Bjorkland, 2013; De Almeida, 2023).

O monitoramento é comumente estruturado em Planos de Controle Ambiental ou Planos Básicos Ambientais, que são obrigações decorrentes das condicionantes das licenças ambientais, sejam elas em análise ou já concedidas. Porém, mais do que simples obrigações, esses planos podem ser considerados ferramentas valiosas de planejamento e gestão ambiental, especialmente conforme o nível de maturidade ambiental do empreendimento (De Almeida, 2023).

É importante destacar que as ações de monitoramento não têm caráter mitigatório; elas funcionam como instrumentos para verificar a eficácia das medidas de controle e mitigação aplicadas (De Almeida, 2023; Sánchez, 2013). Portanto, o monitoramento é fundamental para acompanhar a situação ambiental após a implementação do empreendimento e para avaliar a efetividade das medidas de controle e mitigação em relação aos impactos potenciais identificados. Um monitoramento bem executado também permite uma retroavaliação dos aspectos e impactos ambientais levantados na fase de viabilidade ambiental.

Ainda assim, a fase de acompanhamento da avaliação de impactos ambientais, que inclui a implementação de monitoramentos de diversos indicadores propostos durante a identificação e análise dos impactos, continua sendo uma das mais negligenciadas no licenciamento ambiental brasileiro (Sánchez, 2013). É comum a subutilização dos dados gerados por esses monitoramentos, e é raro que os consultores, empreendedores e órgãos licenciadores promovam uma reflexão crítica ou retroalimentação da análise de impactos ambientais com base nos resultados do monitoramento.

Conforme aponta Kakinami *et al.*, (2020), quando os monitoramentos são vistos apenas como obrigações do licenciamento, impede-se o aprendizado real sobre os impactos e as medidas mitigadoras. Portanto, é urgente um avanço no entendimento da importância da coerência entre impactos, medidas de controle, medidas mitigadoras e monitoramentos. Essa evolução precisa ser promovida tanto pelos consultores e empreendedores, quanto pelos órgãos licenciadores, para garantir que os planos de monitoramento mantenham sua capacidade de avaliar a eficácia e a suficiência das ações de controle e mitigação.

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental não deve ser dissociada da efetiva utilização dos dados gerados por diversos monitoramentos associados às atividades econômicas. Embora muitos desses dados não sejam de origem acadêmica, a vasta quantidade de informações produzidas nos processos de monitoramento

Monitoring is commonly structured in Environmental Control Plans or Basic Environmental Plans, which are obligations arising from the conditions of environmental licenses, whether under analysis or already granted. However, more than simple obligations, these plans can be considered valuable tools for environmental planning and management, especially depending on the level of environmental maturity of the project (De Almeida, 2023).

It is important to highlight that monitoring actions are not mitigating in nature; they function as instruments to verify the effectiveness of the applied control and mitigation measures (De Almeida, 2023; Sánchez, 2013). Therefore, monitoring is essential to monitor the environmental situation after the implementation of the project and to evaluate the effectiveness of the control and mitigation measures in relation to identified potential impacts. Well-executed monitoring also allows a retro-evaluation of the environmental aspects and impacts raised in the environmental feasibility phase.

Even so, the monitoring phase of the environmental impact assessment, which includes the implementation of monitoring of various indicators proposed during the identification and analysis of impacts, continues to be one of the most neglected in Brazilian environmental licensing (Sánchez, 2013). It is common for the data generated by these monitoring processes to be underutilized, and it is rare for consultants, developers and licensing agencies to promote critical reflection or feedback on the analysis of environmental impacts based on the monitoring results.

As pointed out by Kakinami *et al.* (2020), when monitoring is seen only as a licensing obligation, real learning about impacts and mitigation measures is prevented. Therefore, it is urgent to advance the understanding of the importance of coherence between impacts, control measures, mitigation measures, and monitoring. This evolution needs to be promoted by both consultants and developers, as well as by licensing agencies, to ensure that monitoring plans maintain their capacity to assess the effectiveness and sufficiency of control and mitigation actions.

The growing concern for environmental sustainability should not be dissociated from the effective use of data generated by various monitoring processes associated with economic activities. Although much of this data is not of academic origin, the vast amount of information produced in environmental monitoring processes should be better used in the formulation

ambiental deve ser mais bem aproveitada na formulação de políticas públicas ajustadas às realidades locais, além de apoiar as decisões operacionais de empreendimentos, seja isoladamente ou em conjunto.

A recente evolução das técnicas de análise de grandes volumes de dados abre novas e revolucionárias perspectivas para entender os impactos ambientais com base nas informações geradas pelos monitoramentos. No entanto, até o momento, apenas algumas iniciativas pontuais têm promovido uma maior integração na divulgação dos dados primários, bem como na definição de indicadores que possam ser comparados entre diferentes tipos de empreendimentos. Há, portanto, uma necessidade urgente de avanços nesse sentido.

Em relação às cavernas ferríferas, o monitoramento espeleológico constitui uma parte fundamental e obrigatória do processo de licenciamento ambiental. O plano de monitoramento deve ser elaborado antes da emissão da Licença de Instalação e executado ao longo de toda a vigência do empreendimento, com foco na preservação da integridade física e no equilíbrio ecológico das cavernas (Cruz; Piló, 2019).

Nessa linha, as orientações do ICMBio/Cecav (2022) reforçam a necessidade de elaborar um plano de monitoramento, sempre que necessário, com o objetivo de coletar dados, estudar e acompanhar, de forma contínua e sistemática, as variáveis presentes na área de influência[1] da caverna, buscando identificar e avaliar qualitativa e quantitativamente as condições dos processos físicos e biológicos em um dado momento, bem como suas tendências ao longo do tempo.

O monitoramento espeleológico é uma responsabilidade compartilhada entre o empreendedor, que deve elaborar, executar e financiar o plano, e o órgão ambiental competente, que supervisiona, fiscaliza e audita as atividades. De forma geral, o plano de monitoramento deve ser alinhado aos impactos previstos e aos estudos de base. Sempre que possível, é recomendável que os mesmos parâmetros usados nos estudos iniciais de base sejam monitorados, utilizando métodos idênticos ou compatíveis, a fim de garantir a comparabilidade dos dados ao longo do tempo (Sánchez, 2013).

Entre os principais objetivos de um programa de monitoramento espeleológico, destacam-se:

- Garantir a preservação das cavernas, evitando impactos causados pelas atividades do empreendimento;

of public policies adjusted to local realities, in addition to supporting the operational decisions of enterprises, whether individually or in combination.

Recent developments in big data analysis techniques are opening new and revolutionary perspectives for understanding environmental impacts based on information generated by monitoring. However, to date, only a few specific initiatives have promoted greater integration in the dissemination of primary data, as well as in the definition of indicators that can be compared between different types of projects. There is, therefore, an urgent need for progress in this regard.

In relation to ferriferous caves, speleological monitoring constitutes a fundamental and mandatory part of the environmental licensing process. The monitoring plan must be prepared before the issuance of the Installation License and implemented throughout the duration of the project, focusing on preserving the physical integrity and ecological balance of the caves (Cruz; Piló, 2019).

Along these lines, the ICMBio/Cecav (2022) guidelines reinforce the need to develop a monitoring plan, whenever necessary, with the aim of collecting data and studying and monitoring, in a continuous and systematic manner, the variables present in the cave's area of influence[1], seeking to identify and qualitatively and quantitatively evaluate the conditions of the physical and biological processes at a given moment, as well as their trends over time.

Speleological monitoring is a shared responsibility between the entrepreneur, who must prepare, execute and finance the plan, and the competent environmental agency, which supervises, inspects and audits the activities. In general, the monitoring plan must be aligned with the predicted impacts and baseline studies. Whenever possible, it is recommended that the same parameters that were used in the initial baseline studies be monitored, using identical or compatible methods, in order to ensure comparability of data over time (Sánchez, 2013).

The following stand out among the main objectives of a speleological monitoring program:

- Ensure the preservation of caves, avoiding impacts caused by the activities of the project;

[1]Área de Influência: Refere-se à área que abrange os elementos bióticos e abióticos, tanto superficiais quanto subterrâneos, essenciais para a manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola, conforme o Art. 2º da Resolução CONAMA nº 347/2004 e a Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente nº 2/2017.
[1]Area of Influence: Refers to the area that encompasses the biotic and abiotic elements, both superficial and underground, essential for maintaining the ecological balance and physical integrity of the cave environment, according to Art. 2 of CONAMA Resolution Nº 347/2004 and the Normative Instruction of the Ministry of the Environment No. 2/2017.

- Coletar dados de forma periódica para identificar padrões e tendências ambientais;
- Avaliar a eficácia dos programas de controle e mitigação dos impactos e, quando necessário, propor ações corretivas em um curto intervalo de tempo;
- Verificar os impactos reais do empreendimento sobre o patrimônio espeleológico;
- Detectar alterações não previstas na Avaliação de Impactos Ambientais durante o processo de instalação e operação do empreendimento.

É importante frisar que o monitoramento vinculado a processos de licenciamento ambiental não deve ser confundido com o monitoramento geral de qualidade ambiental realizado por órgãos governamentais. O monitoramento específico deve ser planejado com base nos impactos esperados, de modo a distinguir claramente as mudanças causadas pelo empreendimento daquelas originadas por outras atividades ou por causas naturais (Sánchez, 2013).

Uma prática inadequada é concentrar esforços em dezenas de medidas ambientais voltadas a impactos menores e negligenciar ações voltadas aos impactos mais significativos (Jesus *et al.*, 2013). A classificação de um impacto como significativo pode ser subjetiva, pois depende do entendimento, valor e percepção de cada indivíduo. O impacto ambiental de um projeto está intimamente relacionado às suas peculiaridades e à vulnerabilidade ou importância dos componentes ambientais, considerando fatores como a localização do projeto e sua distância de elementos sensíveis (Sánchez, 2013).

Nesse contexto, a avaliação de impactos ambientais, quando bem conduzida, é crucial tanto para a elaboração quanto para o sucesso de um programa de monitoramento (Sánchez, 2013). Analisar previamente os potenciais impactos de um empreendimento antes de sua implementação, permite uma abordagem mais eficaz no controle e mitigação dos riscos, tendo como consequência a compatibilização do desenvolvimento econômico com a preservação do patrimônio espeleológico.

4 MONITORAMENTO EM CAVERNAS FERRÍFERAS: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA A PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO

A legislação brasileira estabelece que cavernas classificadas como de "máxima relevância" em estudos ambientais não podem sofrer impactos negativos irreversíveis, sendo frequentemente o

- Collect data periodically to identify environmental patterns and trends;
- Evaluate the effectiveness of impact control and mitigation programs and, when necessary, propose corrective actions in a short period of time;
- Verify the real impacts of the project on speleological heritage;
- Detect changes not foreseen in the Environmental Impact Assessment during the installation and operation process of the project.

It is important to emphasize that monitoring linked to environmental licensing processes should not be confused with the general environmental quality monitoring carried out by government agencies. Specific monitoring should be planned based on expected impacts in order to clearly distinguish changes caused by the project from those caused by other activities or natural causes (Sánchez, 2013).

An inappropriate practice is to concentrate efforts on dozens of environmental measures aimed at minor impacts and neglect actions aimed at the most significant impacts (Jesus *et al.*, 2013). The classification of an impact as significant can be subjective, as it depends on the understanding, values and perceptions of each individual. The environmental impact of a project is closely related to its peculiarities and the vulnerability or importance of the environmental components, considering factors such as the location of the project and its distance from sensitive elements (Sánchez, 2013).

In this context, the assessment of environmental impacts, when well conducted, is crucial for both the development and success of a monitoring program (Sánchez, 2013). Analyzing the potential impacts of a project before its implementation allows for a more effective approach to controlling and mitigating risks, resulting in the compatibility of economic development with the preservation of speleological heritage.

4 MONITORING IN FERRIFEROUS CAVES: CHALLENGES AND STRATEGIES FOR PRESERVING SPELEOLOGICAL HERITAGE

Brazilian legislation establishes that caves classified as of "maximum relevance" in environmental studies cannot suffer irreversible negative impacts. Furthermore, these caves are often

foco de programas de monitoramento espeleológico associados aos empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental. Por outro lado, cavernas que podem ser impactadas por efeitos irreversíveis (supressão, por exemplo) autorizados pelo órgão ambiental competente, nem sempre são incluídas nesses programas. A necessidade de monitoramento espeleológico em cavernas com potencial para impactos negativos reversíveis deve ser avaliada com base na análise dos parâmetros de intensidade[2], temporalidade[3], reversibilidade[4] e sinergia[5] (Resolução CONAMA nº 347/2004), combinados ainda com o tempo de duração da atividade ou obra prevista.

Em cenários de atividades e obras de curta duração, com impactos de baixa intensidade, reversibilidade e não sinérgicos, um monitoramento contínuo e sistematizado pode não ser eficaz ou adequado. Isso ocorre porque os dados obtidos seriam insuficientes para realizar testes estatísticos robustos e capazes de correlacionar os impactos sobre o patrimônio espeleológico com a atividade ou obra em questão. Nesses casos, os programas de controle e mitigação, que consistem em ações estratégicas para prevenir ou reduzir eventos indesejáveis com potencial de impactar o patrimônio espeleológico, assumem um papel central. Essas ações devem ser implementadas durante as fases de implantação e/ou operação de um empreendimento, com o objetivo de proteger a caverna ou um conjunto de cavernas.

Em um cenário de atividades mais intensas e de maior duração, a seleção das cavernas a serem monitoradas deve considerar diversas variáveis, incluindo:

- O contexto geográfico das cavernas, como a sua posição na vertente e a vegetação circundante;
- A distância entre a fonte geradora do impacto (atividade/infraestrutura) e a caverna receptora, além da sua posição a montante ou a jusante do empreendimento;
- A morfologia da caverna, priorizando cavernas com entradas e condutos mais amplos que permitam o acesso fácil de profissionais e equipamentos, minimizando impactos decorrentes da própria atividade de monitoramento, como pisoteamento excessivo ou danos aos espeleotemas.

the focus of speleological monitoring programs associated with projects subject to environmental licensing. On the other hand, caves that may be impacted by irreversible effects (suppression, for example) authorized by the competent environmental agency are not always included in these programs. The need for speleological monitoring in caves where there is the potential for reversible negative impacts should be assessed based on the analysis of the parameters of intensity[2], temporality[3], reversibility[4] and synergia[5] (CONAMA Resolution Nº 347/2004), combined with the duration of the planned activity or work.

Continuous and systematic monitoring may not be effective or adequate in scenarios involving short-term activities and works with low-intensity, reversible and non-synergistic impacts. This is because the data obtained would be insufficient to perform robust statistical tests capable of correlating the impacts on speleological heritage with the activity or work in question. In these cases, control and mitigation programs, which consist of strategic actions to prevent or reduce undesirable events with the potential to impact speleological heritage, play a central role. These actions should be implemented during the implementation and/or operation phases of a project, with the aim of protecting the cave or group of caves.

In a scenario of more intense and longer-lasting activities, the selection of caves to be monitored must consider several variables, including:

- The geographic context of the caves, such as their position on the slope and the surrounding vegetation;
- The distance between the source generating the impact (activity/infrastructure) and the receiving cave, in addition to its position upstream or downstream of the project;
- The morphology of the cave, prioritizing caves with wider entrances and conduits that allow easy access for professionals and equipment, minimizing impacts resulting from the monitoring activity itself, such as excessive trampling or damage to speleothems.

2 Intensidade: Refere-se à força, energia ou severidade do impacto sobre o meio afetado;
3 Temporalidade: Relacionado ao tempo em que o impacto persiste sobre o ambiente afetado;
4 Reversibilidade: Capacidade do meio afetado de se recompor naturalmente (ou com apoio de programas ambientais), retornando a condições semelhantes às anteriores ao impacto, preservando sua função, estrutura e dinâmica ecossistêmica;
5 Sinergia: Refere-se à interação de um impacto que potencializa outros impactos ou é, por eles, potencializado.
2 Intensity: Refers to the strength, energy or severity of the impact on the affected environment;
3 Temporality: Related to the time during which the impact persists on the affected environment;
4 Reversibility: Capacity of the affected environment to recover naturally (or with the support of environmental programs), returning to conditions similar to those prior to the impact, preserving its function, structure and ecosystem dynamics;
5 Synergy: Refers to the interaction of an impact that enhances other impacts or is enhanced by them.

A distribuição espacial das cavernas em relação ao projeto alvo de licenciamento pode permitir a definição de grupos de cavernas sujeitas a impactos semelhantes. Dessa forma, uma avaliação mais abrangente pode ser feita, considerando a possibilidade de um trabalho mais estratégico, de menor impacto e menor custo. Assim, seleciona-se a caverna mais representativa de um grupo para ser o foco do monitoramento.

4.1 Definição das variáveis ambientais relevantes

Após a escolha das cavernas a serem monitoradas, o próximo passo é a definição das variáveis ambientais a serem avaliadas. Considerando a singularidade de cada caverna, tanto em termos bióticos quanto abióticos, é fundamental reconhecer que cada caverna responde de forma única às pressões ambientais externas, como oscilações de temperatura, umidade e aporte de nutrientes. Portanto, é comum que um plano de monitoramento inclua diferentes indicadores para cavernas dentro de um mesmo programa.

O conhecimento prévio das particularidades físicas e biológicas das cavernas, aliado à análise dos potenciais impactos, é crucial para a definição dos subprogramas de monitoramento. Nesse contexto, Sánchez e Lobo (2016) apontam cinco subprogramas mais recorrentes para monitorar os impactos em cavernas carbonáticas. Para as cavernas ferríferas, aplicam-se os mesmos subprogramas (focados nos aspectos abióticos), além de dois subprogramas adicionais relacionados aos aspectos bióticos, totalizando sete tipos de monitoramento:

- Monitoramento fotográfico;
- Monitoramento geoestrutural;
- Monitoramento sismográfico;
- Monitoramento hidrológico/hidrogeológico;
- Monitoramento microclimático;
- Monitoramento de substratos orgânicos;
- Monitoramento de fauna.

4.2 Implementação do programa de monitoramento

Com a definição dos subprogramas e parâmetros a serem monitorados, o próximo passo é realizar um levantamento inicial das condições ambientais das cavernas, que servirá como base de comparação para futuras avaliações (*background*). As campanhas subsequentes de monitoramento devem ocorrer de forma contínua e sistematizada, sempre que possível nos mesmos períodos amostrados, utilizando métodos científicos robustos e atualizados. A comparação dos dados de cada caverna ao longo do tempo permitirá a identificação de alterações

The spatial distribution of caves in relation to the project targeted for licensing may allow the definition of groups of caves subject to similar impacts. In this way, a more comprehensive assessment can be made, considering the possibility of more strategic work, with less impact and lower cost. Thus, the most representative cave of a group is selected to be the focus of monitoring.

4.1 Definition of relevant environmental variables

After selecting the caves to be monitored, the next step is to define the environmental variables to be assessed. Considering the uniqueness of each cave, in both biotic and abiotic terms, it is essential to recognize that each cave responds uniquely to external environmental pressures, such as fluctuations in temperature, humidity and nutrient supply. Therefore, it is common for a monitoring plan to include different indicators for caves within the same program.

Prior knowledge of the physical and biological characteristics of caves, combined with analysis of potential impacts, is crucial for defining monitoring subprograms. In this context, Sánchez e Lobo (2016) identified the five most common subprograms for monitoring impacts in carbonate caves. The same subprograms (focused on abiotic aspects) apply to ferriferous caves, along with two additional subprograms related to biotic aspects, for a total of seven types of monitoring:

- Photographic monitoring;
- Geostructural monitoring;
- Seismographic monitoring;
- Hydrological/hydrogeological monitoring;
- Microclimatic monitoring;
- Organic substrates monitoring;
- Faunal monitoring.

4.2 Implementation of the monitoring program

Once the subprograms and parameters to be monitored have been defined, the next step is to conduct an initial survey of the environmental conditions of the caves, which will serve as a basis for comparison for future assessments (*baseline* or background). Subsequent monitoring campaigns should be carried out continuously and systematically and, whenever possible, during the same sampling periods, using robust and up-to-date scientific methods. Comparing the data from each cave

significativas em relação aos registros iniciais, possibilitando a avaliação, considerando se essas mudanças foram induzidas pelo empreendimento ou se resultaram de fatores naturais ou de outras atividades no entorno do empreendimento.

4.3 Desafios no monitoramento

No Brasil, o monitoramento espeleológico enfrenta desafios específicos, como as lacunas no conhecimento espeleológico e a escassez de profissionais especializados. Além disso, o monitoramento de cavernas é dificultado pela complexidade dos sistemas naturais e pela localização remota de muitas cavernas. Avanços tecnológicos, como o uso de sensores remotos, drones e modelos computacionais, têm facilitado a coleta de dados em tempo real, mas ainda existem limitações.

Aliado a isso, o monitoramento espeleológico também enfrenta outros desafios, tais como:

- Padronização metodológica: Métodos diversos de coleta e análise de dados podem dificultar a comparação entre estudos;
- Acuracidade das informações: Garantir a precisão e confiabilidade dos dados é essencial, mas pode ser dificultada pela variabilidade dos ecossistemas e das condições ambientais;
- Integração dos dados: Informações fragmentadas podem comprometer a análise dos resultados;
- Recursos técnicos e financeiros: A falta de recursos pode limitar a capacidade de execução de programas de monitoramento;
- Escassez de informações sobre as espécies cavernícolas: A fauna cavernícola revela uma grande quantidade de grupos taxonômicos pouco estudados ou ainda não descritos formalmente, o que reflete a carência de taxonomistas especializados.

Por fim, é essencial que a análise dos dados coletados seja realizada com cautela, evitando que limitações técnicas, financeiras ou impressões pessoais influenciem indevidamente as decisões relacionadas às ações corretivas ou de mitigação. A abordagem precisa ser objetiva, focada na preservação do patrimônio espeleológico e no cumprimento das exigências ambientais (Sánchez, 2013).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, o monitoramento espeleológico se estabelece como uma ferramenta indispensável na preservação das

over time will allow the identification of significant changes in relation to initial records, enabling an assessment to be made, considering whether these changes were induced by the project or whether they resulted from natural factors or other activities in the surrounding area.

4.3 Monitoring challenges

Speleological monitoring faces specific challenges in Brazil, such as gaps in speleological knowledge and shortages of specialized professionals. In addition, cave monitoring is hampered by the complexity of natural systems and the remote location of many caves. Technological advances, such as the use of remote sensing, drones and computer models, have facilitated real-time data collection, but limitations remain.

In addition to this, speleological monitoring also faces other challenges, such as:

- Methodological standardization: different methods of data collection and analysis can make comparisons between studies difficult;
- Accuracy of information: ensuring the accuracy and reliability of data is essential, but can be hampered by the variability of ecosystems and environmental conditions;
- Data integration: fragmented information can compromise the analysis of results;
- Technical and financial resources: lack of resources can limit the capacity to execute monitoring programs;
- Lack of information on cave species: cave faunas reveal a large number of taxonomic groups that have been little studied or not yet formally described, which reflects the lack of specialized taxonomists.

Finally, it is essential that the analysis of the collected data be carried out with caution, preventing technical or financial limitations or personal impressions from unduly influencing decisions related to corrective or mitigating actions. The approach must be objective, focused on the preservation of speleological heritage and compliance with environmental requirements (Sánchez, 2013).

5 FINAL CONSIDERATIONS

In summary, speleological monitoring is an indispensable tool for cave preservation, functioning as a continuous and

cavernas, funcionando como um processo contínuo e sistematizado de coleta, análise e interpretação de dados. Sua eficácia, especialmente em programas de proteção de cavernas, só pode ser adequadamente avaliada por meio de um plano robusto de monitoramento. Embora haja desafios significativos, como a padronização metodológica e a integração dos dados, o monitoramento espeleológico se apresenta como um meio fundamental para identificar tendências, implementar ações corretivas antecipadas e aprimorar o conhecimento sobre os aspectos biológicos, físicos e ecológicos do ambiente cavernícola.

Particularmente no contexto de empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental, o monitoramento espeleológico deve ser planejado de acordo com os impactos ambientais identificados, considerando as especificidades de cada atividade e seus potenciais efeitos sobre o patrimônio espeleológico. Nesse cenário, a eficácia do monitoramento depende não apenas da coleta de dados, mas também de sua análise crítica e integrada, com vistas a garantir a mitigação dos impactos e a conservação das cavernas.

Ao longo deste livro, os métodos e técnicas aplicáveis ao monitoramento de cavernas inseridas na formação ferrífera serão explorados em detalhe. Além disso, serão discutidos os parâmetros ambientais que devem ser acompanhados para garantir a preservação dessas cavernas, assim como as perspectivas futuras dessa área de estudo.

Por fim, é importante ressaltar que o monitoramento espeleológico não deve ser encarado como uma prática isolada, mas como parte de um esforço contínuo para a construção de um conhecimento cada vez mais profundo sobre o ambiente cavernícola e os impactos que as atividades humanas podem ter sobre ele. Em um futuro onde a conscientização ambiental cresce, o monitoramento espeleológico se consolidará como uma prática essencial para garantir o desenvolvimento sustentável e a preservação de um dos maiores patrimônios naturais do nosso planeta.

6 AGRADECIMENTOS

Encerramos este capítulo com agradecimentos à Vale S.A., pela oportunidade de colaborar com esta publicação, e ao time da Gerência de Espeleologia, bem como às instituições parceiras e aos profissionais que colaboraram tecnicamente, seja por meio do compartilhamento de dados e conhecimentos, seja por meio da realização de estudos e revisões técnicas. Esperamos que esta contribuição fortaleça as boas práticas voltadas à conservação e ao manejo responsável das cavidades naturais subterrâneas.

systematic process of data collection, analysis and interpretation. Its effectiveness, especially in cave protection programs, can only be adequately assessed through a robust monitoring plan. Although there are significant challenges, such as methodological standardization and data integration, speleological monitoring presents itself as a fundamental means of identifying trends, implementing early corrective actions and improving knowledge about the biological, physical and ecological aspects of cave environments.

Particularly in the context of projects subject to environmental licensing, speleological monitoring must be planned according to the identified environmental impacts, considering the specificities of each activity and its potential effects on speleological heritage. The effectiveness of monitoring in such scenarios depends not only on data collection, but also on its critical and integrated analysis, with a view to ensuring the mitigation of impacts and the conservation of caves.

Throughout this book, the methods and techniques applicable to the monitoring of caves inserted in ferriferous formations will be explored in detail. In addition, the environmental parameters that must be monitored to ensure the preservation of these caves will be discussed, as will the future perspectives of this area of study.

Lastly, it is important to emphasize that speleological monitoring should not be seen as an isolated practice, but as part of an ongoing effort to build increasingly in-depth knowledge about the cave environment and the impacts that human activities can have on it. In a future where environmental awareness grows, speleological monitoring will consolidate itself as an essential practice to ensure sustainable development and the preservation of one of the greatest natural heritages of our planet.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Vale S.A. for the opportunity to collaborate on this publication, as well as the Gerência de Espeleologia team and the partner institutions and professionals who contributed technical expertise by sharing data and knowledge or carrying out studies and technical reviews. We hope that this contribution will promote best practices for the conservation and responsible management of underground natural cavities.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ALMEIDA, A. N. de; MARTINS, S. D. Evolução da qualidade dos planos de mitigação e monitoramento nos estudos de impacto ambiental. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 12, n. 1, p. e12355-e12355, 2023. DOI: http://orcid.org/0000-0002-9113-0729

ANTIĆ, A.; MAYOR, A. Geomythology, caves, and tourism: history and future perspectives. **International Journal of Tourism Anthropology**, v. 9, n. 2, p. 99-112, 2023. DOI: 10.1504/IJTA.2023.130850

APPIAH-OPOKU, S.; BRYAN, H. C. EA follow-up in the Ghanaian mining sector: challenges and opportunities. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 41, p. 38-44, 2013. DOI: 10.1016/j.eiar.2013.02.003

AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 70-72, 2005.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 5 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF. Acesso em: 7 mar. 2025.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. *In*: **Normas.leg.br**. Brasília: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://encurtador.com.br/pKqvr. Acesso em: 7 mar. 2025.

BRASIL. Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. [Revogado pelo Decreto nº 10.935, de 2022]. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 out. 1990a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d99556.htm. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Portaria nº 887, de 15 de julho de 1990. **Diário Oficial [da] República da União**, Brasília, DF, nº 117, p. 11844, 20 jun. 1990b. Disponível em: https://www2.mppa.mp.br/sistemas/gcsubsites/upload/41/Portaria%20887.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Portaria nº 57, de 5 de junho de 1997. **Diário Oficial [da] República da União,** Brasília, DF, 6 jun. 1997. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/PT0057-050697.PDF. Acesso em: 5 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 347, de 10 de setembro de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 176, p. 54-55, 13 set. 2004. Disponível em: http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=217. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007. Dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes (...). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 ago. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11516.htm. Acesso em: 7 mar. 2025.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 nov. 2008. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm. Acesso em: 12 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2009)]. Portaria nº 358, de 30 setembro 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 188, 1 out. 2009. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/legislacao-espeleologica/14-portaria_mma_358_300909_plano_nacional.pdf. Acesso em: 15 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2017a)]. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Instrução Normativa nº 01/2017, de 24 de janeiro de 2017**. Brasília: MMA, 2017a. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/legislacao/instrucoes-normativas/arquivos/intrucao_normativa_01_2017.pdf. Acesso em: 8 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2017b)]. Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017. **Diário Oficial da União**, ed. 169, sec. 1, p. 161, 1 set. 2017b. Disponível em: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042. Acesso em: 6 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2019)]. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Instrução Normativa Conjunta Nº 8, de 27 de setembro de 2019. **Diário Oficial da União**, ed. 193, sec. 1, p. 52, 4 out. 2019. Disponível em: http://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-conjunta-n-8-de-27-de-setembro-de-2019-219919958. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2022a)]. **Monitoramento ambiental**. [Brasília: s. n.], 2022a. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/ biomas/monitoramento-ambiental.html. Acesso em: 15 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Área de influência sobre o patrimônio espeleológico**: orientações básicas à realização de estudos espeleológicos. Brasília: ICMBIO, 2022b.

BRASIL. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no

território nacional. **Diário Oficial [da] República da União**, Brasília, DF, 12 jan. 2022c. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Decreto/D10935.htm. Acesso em: 15 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2023)]. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Relatório Anual 2022**. Brasília: ICMBio; Cecav, 2023. Relatório. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/publicacoes/relatorio-anual-2022_site.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. **Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental – ADPF nº 935, de 24 de janeiro de 2022**. Processo 0112958-68.2022.1.00.0000. Ementa: referendo na medida cautelar na arguição de descumprimento de preceito fundamental, decreto n. 10.935/2022, proteção das cavidades naturais subterrâneas no território nacional. Brasília, DF, 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente [ICMBio/CECAV (2025)]. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE**. [Quantidade de cavernas cadastradas até 13 de fevereiro de 2025]. [c2025]. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie. Acesso em: 6 mar. 2025.

BJORKLAND, R. Monitoring: The missing piece: a critique of NEPA monitoring. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 43, p. 129–134, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.07.001

CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (orgs.). **Espeleologia e licenciamento ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019. p. 262.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. **The biology of caves and other subterranean habitats**. 2. ed. [*S. l.*]: Oxford University Press, 2019.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O carste**, v. 17, n. 3, p. 106–115, 2005. Disponível em: https://encurtador.com.br/QFngG. Acesso em: 10 fev. 2024.

FERREIRA, R. L.; HORTA, L. C. S. Natural and human impacts on invertebrate communities in Brazilian caves. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 61, p. 7–17, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/S0034-71082001000100003

FERREIRA, R. L.; POMPEU, P. S. Fatores que influenciam a riqueza e a diversidade da fauna associada a depósitos de guano da gruta Taboa, Sete Lagoas, MG, Brasil. **O Carste**, v. 9, n. 2, 1997.

GLASSON, J. Life after the decision: the importance of monitoring in EIA. **Built Environment (1978-)**, v. 20, n. 4, p. 309–320, 1994. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/23287803. Acesso em: 10 mar. 2025.

JESUS, J. de *et al*. **Mitigation in impact assessment**. Fargo: International Association for Impact Assessment, 2013. (Fastips, 6). Disponível em: https://iaia.org/uploads/pdf/Fastips_6Mitigation.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

KAKINAMI, S. H. *et al*. A regionalização de programas ambientais: um caminho para a otimização do monitoramento ambiental das atividades de P&G offshore. *In*: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2020, Rio de Janeiro. **Conference Proceedings** [...]. Rio de Janeiro: Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute, 2020. DOI: https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.504

KEMERICH, P. D. da C.; RITTER, L. G.; BORBA, W. F. de. Indicadores de sustentabilidade ambiental: métodos e aplicações. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 4, p. 3718–3722, 2014. DOI: https://doi.org/10.5902/2236130814411

LOBO, H. A. S.; MORETTI, E. C. Sustentabilidade ecológica do espeleoturismo na Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul. **Revista Turismo em Análise**, v. 20, n. 1, p. 151–167, 2009. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.1984-4867.v20i1p151-167

LIKENS, G. E. (ed.). **Long-term studies in ecology**: approaches and alternatives. [New York]: Springer-Verlag New York Inc., 2012.

MAGNUSSON, W. *et al*. **Biodiversidade e monitoramento ambiental integrado**. Santo André: Áttema Editorial, 2013.

MAMMOLA, S. *et al*. Scientists' warning on the conservation of subterranean ecosystems. **BioScience**, v. 69, n. 8, p. 641–650, 2019. DOI: 10.1093/biosci/biz064

PARANÁ. Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo. **Monitoramento ambiental**. Curitiba: IAT, 2022. Disponível em: https://encurtador.com.br/xEkNI. Acesso em: 10 mar. 2025.

PARKER, C. W. *et al*. Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás Formation, Brazil. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 16., Praha, Czech Republic. **Proceedings** [...]. Praha: Czech Speleological Society, 2013. p. 21–28.

PILÓ, L. B. *et al*. Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia. **Plos One**, v. 18, n. 5, p. 1–24, 2023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267870

RUCHKYS, U. de A. et al. Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero. **Minas Gerais. Campinas:** SBE, v. 341, 2015.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (orgs.). **Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.

SILVA, M. S.; 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. DOI: 10.1007/s10531-011-0057-5

WALTHAM, T.; LOWE, D. Caves and Karst of the Yorkshire Dales. *In*: O'CONNOR, T. P.; LORD, T. **Cave palaeontology**. Buxton: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. v. 1. cap. 15. p. 225–238.

WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (ed.). **Encyclopedia of caves**. [*S. l.*]: Elsevier Inc., 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/C2010-0-64793-6

WHITE, W. B. *et al*. Cave sediments and paleoclimate. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 69, n. 1, p. 76–93, 2007. Disponível em: https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/784. Acesso em: 10 mar. 2025.



Aranha da família Prodidomidae / Spider of the Family Prodidomidae
Foto/Photo: Matheus H. Simões

Monitoramento da fauna em cavernas ferríferas

MATHEUS HENRIQUE SIMÕES
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO
THADEU PIETROBON
XAVIER PROUS

1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal dos programas de monitoramento vinculados ao licenciamento ambiental é acompanhar parâmetros naturais que podem ser afetados pelos empreendimentos e suas atividades, sendo possível corrigir e mitigar antes que o impacto se torne irreversível. Em cavernas, assim como em ecossistemas epígeos, os invertebrados compõem a maior parte da biodiversidade existente. No entanto, muitas vezes são negligenciados pela sociedade por não conhecer sua importância em relação aos inúmeros serviços ecossistêmicos prestados. Cardoso *et al.* (2011) apontam sete motivos que dificultam ou impedem a efetiva conservação da biodiversidade de invertebrados:

- Dilema público – as pessoas não conhecem os seus serviços ecológicos;
- Dilema político – os problemas que afetam a sua conservação são desconhecidos dos tomadores de decisão;
- Dilema científico – conhecimentos básicos fundamentais e suporte financeiro para pesquisas ainda são escassos;
- Déficit Lineano – a maioria das espécies não está descrita;
- Déficit Wallaceano – a distribuição das espécies é maioritariamente desconhecida;
- Déficit Prestoniano – a abundância das espécies e as suas alterações no espaço e no tempo são desconhecidas;
- Déficit Hutchinsoniano – a ecologia das espécies e a sua sensibilidade às alterações do habitat são, em grande parte, desconhecidas.

Para a fauna cavernícola, de modo geral, as barreiras e lacunas citadas acima também são aplicáveis, pois dificultam o planejamento de programas de monitoramento. Por sua vez, no longo prazo, os monitoramentos podem, efetivamente, contribuir com a resolução dos dilemas e déficits existentes sobre o conhecimento da fauna subterrânea brasileira, desde que sejam bem planejados, com delineamento metodológico correto e que seja dada ampla divulgação dos resultados obtidos. Além disso, os resultados destes monitoramentos podem ajudar nas melhores práticas para o uso dos recursos naturais e a preservação do patrimônio espeleológico.

Monitoring fauna in ferriferous caves

MATHEUS HENRIQUE SIMÕES
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO
THADEU PIETROBON
XAVIER PROUS

1 INTRODUCTION

The main objective of monitoring programs linked to environmental licensing is to monitor natural parameters that may be affected by projects and their activities, so that it is possible to correct and mitigate them before the impact becomes irreversible. In caves, as in epigeal ecosystems, invertebrates comprise most of the biodiversity, although they are often neglected by society because of unawareness of their importance in relation to the countless ecosystem services they provide. Cardoso *et al*. (2011) identify seven reasons that hinder or impede the effective conservation of invertebrates biodiversity:

- Public dilemma – people do not know about their ecological services.
- Political dilemma – the problems that affect their conservation are unknown to decision makers;
- Scientific dilemma – fundamental basic knowledge and financial support for research remain scarce;
- Linnaean deficit – most species are not described;
- Wallacean deficit – the distribution of species is mostly unknown;
- Prestonian deficit – the abundance of species and their changes in space and time are unknown;
- Hutchinsonian deficit – the ecology of species and their sensitivity to habitat changes are largely unknown.

The barriers and gaps mentioned above are also applicable to cave fauna in general, as they make the planning of monitoring programs difficult. In turn, in the long term, monitoring can effectively contribute to resolving existing dilemmas and deficits regarding knowledge of Brazilian subterranean fauna, as long as they are well planned, with correct methodological designs and widely-disseminated results. Furthermore, the results of this monitoring can help to best practices for the use of natural resources and the preservation of speleological heritage.

Além da megadiversidade de espécies, o Brasil também pode ser considerado um país com elevada diversidade de cavernas, localizadas de Norte a Sul do país, formadas em diferentes tipos de rochas (e.g. siliciclásticas, carbonáticas, ferríferas, ígneas), inseridas em todos os biomas e, por consequência, expostas a aspectos ambientais e ecológicos que podem ser completamente distintos e que devem sempre ser considerados durante a fase de planejamento dos estudos biológicos. O tamanho das cavernas e a composição litológica, por exemplo, têm forte influência na fauna, como já visto por Souza-Silva, Martins e Ferreira (2011a). Assim, devem ser evitadas tentativas de padronizações metodológicas sem levar esses aspectos em consideração.

Diante das dificuldades e características incipientes relacionadas ao ambiente cavernícola, é necessário conhecer as espécies que ocupam o ambiente para o planejamento de um bom programa de monitoramento de fauna. Neste sentido, o primeiro passo é realizar um bom inventário de fauna. Outro ponto importante é identificar qual o *status* ecológico-evolutivo das espécies (e.g. Sket, 2008), uma vez que esta classificação pode indicar maior ou menor vulnerabilidade das mesmas frente às diferentes atividades antrópicas. Segundo Zampaulo e Simões (2022), no Brasil tem-se aplicado os conceitos utilizados por pesquisadores americanos (e.g. Barr, 1968), inclusive na própria legislação espeleológica, separando as espécies em troglóbias, troglófilas, trogloxenas e acidentais, conforme Tabela 1.

Segundo Ferreira (2013), os programas de monitoramento devem contemplar os grupos mais conspícuos e vulneráveis, que sejam passíveis de identificação em campo. Sugere ainda, uma atenção especial aos troglóbios, pelo fato de ocuparem um ambiente estável e apresentarem maior sensibilidade a variações ambientais. No entanto, é preciso considerar que muitas vezes

In addition to having a megadiversity of species, Brazil can also be considered a country with a high diversity of caves. Brazilian caves are located from the North to the South regions of the country, formed in different types of rocks (e.g. siliciclastic, carbonatic, ferriferous, igneous), inserted in all biomes and, consequently, exposed to environmental and ecological conditions that can be completely different, yet must always be considered during the planning phase of biological studies. Cave size and lithological composition, for example, have a strong influence on fauna, as already seen by Souza-Silva, Martins and Ferreira (2011a). Therefore, attempts at methodological standardization without considering these aspects should be avoided.

Given the difficulties and incipient characteristics related to the cave environment, the species that occupy it must be known to plan a good fauna monitoring program. In this sense, the first step is a good faunal inventory. Another important point is to identify the ecological-evolutionary status of the species present (e.g. Sket, 2008), since this classification may indicate greater or lesser vulnerability of species to different human activities. According to Zampaulo and Simões (2022), the concepts used by American researchers (e.g. Barr, 1968) have been applied in Brazil, including in speleological legislation itself, with the separation of species into troglobites, troglophiles, trogloxenes and accidentals, as shown in Table 1.

According to Ferreira (2013), monitoring programs must include the most conspicuous and vulnerable groups, that can be identified in the field. They also suggest that special attention be paid to troglobites since they occupy a stable environment and are sensitive to environmental variation. However, it is

Tabela 1: Classificações e definições mais utilizadas para a fauna subterrânea no Brasil.
Table 1: Most used classifications and definitions for subterranean fauna in Brazil.

Troglóbio / Troglobite	Ocorrência restrita ao ambiente subterrâneo Occurrence restricted to the subterranean environment
Troglófilo / Troglophile	Capazes de completar todo o seu ciclo de vida no meio hipógeo e ou epígeo Capacity to complete entire life cycle in the hypogeal and/or epigeal environment
Troglóxeno / Trogloxene	Obrigatoriamente devem sair das cavernas para completar seu ciclo de vida Must leave cave to complete life cycle
Acidental / Accidental	Ingressam no ambiente cavernícola, mas não apresentam nenhuma pré-adaptação que proporcione a sua sobrevivência dentro destes ecossistemas Enter the cave environment, but do not possess any pre-adaptation that provides their survival within these ecosystems

as populações de espécies troglóbias são reduzidas ou não têm as macro cavernas como seu habitat principal, necessitando de estratégias específicas.

Outro ponto importante é definir onde e quais parâmetros biológicos deverão ser monitorados, sendo esses os principais desafios nesse tipo de estudo (Culver; Sket, 2002). Por exemplo, em cavernas quilométricas o monitoramento de toda a área e comunidade seria inviável, sendo necessário utilizar métodos variados, além de selecionar locais e espécies de interesse. Por outro lado, em cavernas pequenas seria possível acessar todos os parâmetros da comunidade e populações. Assim, basear-se em uma boa caracterização do ambiente e da fauna, ainda na etapa de diagnóstico, é o melhor caminho para um bom planejamento dos programas de monitoramento.

A maioria dos estudos de monitoramento da fauna subterrânea brasileira foi realizada em cavernas turísticas, buscando entender, principalmente, os impactos da visitação e da iluminação artificial nas espécies troglóbias (Simões; Souza-Silva; Ferreira, 2022). Monitoramentos biológicos em cavernas ferríferas ainda são escassos na literatura, estando restritos aos programas que envolvem o licenciamento ambiental para atendimento da legislação brasileira. Mesmo que seja um reflexo da legislação que ainda é recente, o próprio conhecimento sobre a biologia dessas cavernas ainda está sendo construído. Até o início do século XXI não existiam estudos sobre fauna e ecologia de cavernas em litologia ferrífera (Ferreira, 2005). No entanto, nas últimas duas décadas, estudos biológicos em cavernas nesta litologia têm demonstrado a existência de uma fauna bastante diversificada, com inúmeras espécies troglóbias e aspectos ecológicos intrínsecos a estes ecossistemas (Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a).

As cavernas associadas às formações ferríferas possuem características completamente distintas das demais litologias. Em relação ao tamanho, estas, em geral, possuem em média 30 metros de extensão, com poucas ultrapassando os 100 metros (Piló; Auler; Martins, 2015). Além disso, os processos de formação e o tamanho podem variar dependendo da região onde estão inseridas (Auler *et al.*, 2022). Cavernas ferríferas na região Norte do país, em geral, são maiores do que as ocorrências conhecidas em outras regiões. Por sua vez, essas diferenças regionais ou mesmo locais também influenciam a fauna e a ecologia desses ambientes. Por exemplo, a distribuição das espécies e os níveis de endemismos são distintos entre as cavernas ferríferas da região de Carajás, no estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas

necessary to consider that troglobite species populations are often small or do not have macro-caves as their main habitat, requiring specific monitoring strategies.

Another important point is to define which biological parameters should be monitored and where, which are the main challenges of this type of study (Culver; Sket, 2002). For example, monitoring the entire area and community of kilometric-scale caves would be unfeasible, requiring the use of different methods, in addition to selecting locations and species of interest. On the other hand, all community and population parameters could be assessed in small caves. Therefore, the best way to plan a good monitoring program is to base it on a good characterization of the environment and fauna, even at the diagnosis stage.

Most monitoring studies of Brazilian subterranean fauna have been carried out in tourist caves, seeking to understand, mainly, the impacts of visitation and artificial lighting on troglobitic species (Simões; Souza-Silva; Ferreira, 2022). Biological monitoring in iron caves is still scarce in the literature, being restricted to programs that involve environmental licensing to comply with Brazilian legislation. Even though it reflects legislation that is still recent, knowledge about the biology of these caves is still being assembled. There were no studies on the fauna and ecology of caves in iron lithology (Ferreira, 2005) until the beginning of the 21st century. However, the last two decades have seen biological studies in caves in this lithology demonstrate the existence of a very diverse fauna, with numerous troglobitic species and ecological aspects intrinsic to these ecosystems (Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a).

The caves associated with iron formations have completely different characteristics from those of other lithologies. In general, their length averages 30 meters long, with few exceeding 100 meters (Piló; Auler; Martins, 2015). Furthermore, the formation processes and size may vary depending on the region where they are located (Auler *et al.*, 2022). Iron caves in the North region of Brazil are generally larger than known occurrences in other regions. In turn, these regional or even local differences also influence the fauna and ecology of these environments. For example, the distribution of species and levels

Gerais (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2018). Por serem maiores, as cavernas localizadas na região de Carajás, no norte do país, podem abrigar grandes populações de vertebrados e invertebrados, como as *bat caves*, responsáveis pela manutenção de ecossistemas complexos com populações compostas por milhares de morcegos do gênero *Pteronotus*, além de colônias de outras espécies, o que raramente acontece nas outras regiões do Brasil onde ocorrem cavernas em rochas ferríferas.

Sendo assim, diante das dificuldades em definir protocolos padronizados para o monitoramento de invertebrados e das particularidades das cavernas ferríferas, neste capítulo serão apresentadas as melhores práticas realizadas até o momento e adotadas em programas vinculados ao licenciamento ambiental nos estados de Minas Gerais e Pará. Este é um tema ainda recente e em construção, portanto, esse é um primeiro passo na busca do aprimoramento destes estudos.

2 O QUE MONITORAR

Diferentemente do ambiente epígeo terrestre e aquático, para os quais já existem inúmeras diretrizes para a realização de programas de monitoramento biológico, para sistemas subterrâneos ainda são incipientes os parâmetros que devem ser avaliados ao longo do tempo (para revisão ver Cruz; Piló, 2019), principalmente em cavernas ferríferas. Segundo Ferreira (2019b), antes de implementar programas de monitoramento biológico é necessário realizar a avaliação ecológica da caverna, levantando parâmetros como composição, abundância, riqueza, diversidade, variação espaço/temporal da fauna, além da estrutura e da dinâmica trófica do sistema. Assim, a definição do que monitorar parte do pressuposto de que o entendimento sobre os aspectos ecológicos da caverna é o primeiro passo a ser considerado.

2.1 Fauna

O monitoramento da fauna cavernícola representa um grande desafio em programas vinculados a processos de licenciamento ambiental, principalmente pelas dificuldades relacionadas às peculiaridades da fauna e como o período de amostragem e a disponibilidade de recursos podem influenciar nos resultados (Trajano, 2013), em especial, das espécies de invertebrados. Parâmetros ecológicos dessas espécies são influenciados por muitos fatores. Em cavernas ferríferas, a riqueza de espécies é fortemente relacionada com o tamanho da caverna, a presença de água, a disponibilidade de recursos, o microclima e

of endemism differ between iron caves in the Carajás region, in the state of Pará, and the Quadrilátero Ferrífero, in the state of Minas Gerais (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2018). Because they are larger, caves located in the Carajás region, in the north of the country, can house large populations of vertebrates and invertebrates, such as bat caves, and are responsible for maintaining complex ecosystems with populations made up of thousands of bats of the genus *Pteronotus*, as well as colonies of other species, which rarely happens in other Brazilian regions where caves occur in iron rocks.

Therefore, given the difficulties in defining standardized protocols for monitoring invertebrates, and the particularities of iron caves, this chapter will present the best practices carried out to date and adopted in programs linked to environmental licensing in the states of Minas Gerais and Pará. This topic is still incipient and under development, and so this represents a first step towards improving these studies.

2 WHAT TO MONITOR

Unlike the terrestrial and aquatic epigeal environment, for which there are already numerous guidelines for carrying out biological monitoring programs, the parameters that must be evaluated over time for subterranean systems are still incipient (for review see Cruz; Piló, 2019), especially for iron caves. According to Ferreira (2019b), before implementing biological monitoring programs, it is necessary to carry out an ecological assessment of the cave, surveying parameters such as composition, abundance, richness, diversity, and spatial/temporal variation of the fauna, in addition to the structure and trophic dynamics of the system. Therefore, the definition of what to monitor is based on the assumption that understanding the ecological aspects of the cave is the first step to be considered.

2.1 Fauna

Monitoring cave fauna represents a major challenge in programs linked to environmental licensing processes, mainly due to difficulties related to the peculiarities of the fauna and how the sampling period and availability of resources can influence the results (Trajano, 2013), particularly for invertebrate species. Ecological parameters of invertebrates are influenced by many factors. For iron caves, species richness is strongly related

as características do entorno (Ferreira *et al.*, 2015; Jaffé *et al.*, 2016, 2018; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a), enquanto a composição é, principalmente, influenciada por características do entorno, período do ano, declividade do piso da caverna, litotipo e a concentração de cavernas em uma determinada região (Ferreira *et al.*, 2015; Jaffé *et al.*, 2018).

Outra característica importante é a dissimilaridade ao longo do tempo, provocada pelo alto *turnover* de espécies entre os diferentes períodos do ano (seco e chuvoso), principalmente em cavernas menores (Ferreira *et al.*, 2015). Embora ainda seja um parâmetro pouco explorado nos estudos ecológicos de cavernas ferríferas, um estudo recente demonstrou que a abundância de algumas espécies é influenciada pelas características do entorno das cavernas (Trevelin *et al.*, 2021). A forte influência das características internas e externas nos parâmetros ecológicos das cavernas ferríferas torna difícil a escolha do que monitorar, o que é agravado quando consideramos que para avaliar esses parâmetros é necessária a coleta recorrente de material biológico, uma vez que a identificação em laboratório se faz necessária para a grande maioria dos táxons. Além disso, no curto prazo, é difícil diferenciar variações naturais daquelas causadas por alterações antrópicas.

De forma geral, os programas de monitoramento da fauna podem ser realizados utilizando parâmetros populacionais (espécies indicadoras) e de comunidades. Segundo Dornelas e colaboradores (2013), avaliar as mudanças temporais em comunidades biológicas (riqueza, diversidade e composição de espécies) permite identificar mudanças ecológicas decorrentes tanto de processos naturais quanto antrópicos. No entanto, as características das cavernas, como a baixa disponibilidade de recursos e a presença de espécies com baixa abundância populacional, assim como a necessidade de coletar um elevado número de indivíduos, tornam o acesso a estas informações um possível impacto para algumas populações, principalmente as mais raras, como as espécies troglóbias.

Sendo assim, uma alternativa amplamente utilizada é o monitoramento de espécies indicadoras, que consiste em selecionar uma ou mais populações, de um ou mais táxons, que, por vezes, são sensíveis a alterações no ambiente, para as quais os parâmetros populacionais são de fácil detecção no ambiente natural (e.g. abundância e densidade), tornando-se um método de bom custo-benefício (Spellerberg, 2005). Vale ponderar que para cavernas o conhecimento sobre espécies indicadoras ainda está em desenvolvimento e a escolha do

to cave size, the presence of water, resource availability, the microclimate and characteristics of the surroundings (Ferreira *et al.*, 2015; Jaffé *et al.*, 2016, 2018; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a), while composition is mainly influenced by characteristics of the surroundings, time of year, slope of the cave floor, lithotype and the concentration of caves in a given region (Ferreira *et al.*, 2015; Jaffé *et al.*, 2018).

Another important characteristic is dissimilarity over time, caused by the high turnover of species between different periods of the year (dry and rainy), especially in smaller caves (Ferreira *et al.*, 2015). Although it is still a little explored parameter in ecological studies of iron caves, a recent study demonstrated that the abundance of some species is influenced by the characteristics of the cave surroundings (Trevelin *et al.*, 2021). The strong influence of internal and external characteristics on the ecological parameters of iron caves makes it difficult to choose what to monitor, which is aggravated by the need to recurrently collect biological samples to evaluate these parameters, since laboratory identification is necessary for the most taxa. Furthermore, in the short term, it is difficult to differentiate natural variation from that caused by anthropogenic changes.

In general, fauna monitoring programs can be carried out using population parameters (indicator species) and communities. According to Dornelas *et al.* (2013), evaluating temporal changes in biological communities (species richness, diversity and composition) allows ecological changes resulting from both natural and anthropic processes to be identified. However, the characteristics of caves, such as low resource availability and the presence of species with low population abundances, as well as the need to collect a high number of individuals, make acquiring this information a potentially impactful activity for some populations, mainly the rarest, such as troglobitic species.

Therefore, a widely used alternative is the monitoring of indicator species. This consists of selecting one or more populations, of one or more taxa, which are sometimes sensitive to changes in the environment, for which population parameters are easy to detect in the natural environment (e.g. abundance and density), making it a cost-effective method (Spellerberg, 2005). It is worth considering that knowledge about indicator species for caves is still developing and the choice of method must be

método deve ser cautelosa. Além disso, programas que utilizem espécies indicadoras devem considerar protocolos rigorosos e de longo prazo, mesmo diante da urgência com que as decisões de conservação devem ser tomadas (Mcgeoch, 1998).

Considerando as duas principais regiões ferríferas do Brasil, é nítida a diferença nos parâmetros monitorados nos programas vinculados aos processos de licenciamento ambiental, mas essa diferença é compreensível. Enquanto na região do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, comumente são monitorados parâmetros de comunidades, na região de Carajás, estado do Pará, a seleção de espécies potencialmente indicadoras tem sido mais utilizada. O monitoramento de populações na região do Quadrilátero Ferrífero é dificultado pelo menor tamanho das cavernas e, consequentemente, raros casos de populações bem estabelecidas no ambiente cavernícola. Já na região de Carajás ocorrem as maiores cavernas ferríferas do mundo e espécies que apresentam grandes populações, muitas vezes compostas por dezenas e até milhares de indivíduos. Estudos recentes realizados por Trevelin e colaboradores (2018; 2021), permitiram inclusive a sinalização de espécies bioindicadoras para cavernas dessa região do país.

Dessa forma, para a definição de quais parâmetros ambientais e ecológicos deverão ser avaliados em cada programa de monitoramento de invertebrados cavernícolas, deve-se levar em consideração as condições ambientais e biológicas de cada caverna, bem como da região onde ela está inserida. Assim, deve-se buscar sempre o equilíbrio entre o menor esforço de recursos humanos e financeiros, o menor impacto causado nestes ambientes, o que pode ocorrer pela necessidade de incursão nestes ecossistemas e a obtenção de amostragens repetidas, bem como, e não menos importante, pela qualidade dos dados obtidos. Assim, no Tabela 2 são apresentadas recomendações para utilização dos principais parâmetros em programas de monitoramento de invertebrados em cavernas ferríferas.

2.2 Dinâmica trófica

Além das informações sobre a fauna, existem outros parâmetros que precisam ser monitorados, pois, como já mencionado, influenciam significativamente as populações cavernícolas. Esses parâmetros, comumente, fazem parte dos programas de monitoramento e serão tratados em capítulos específicos neste livro (ex.: aspectos hídricos e climáticos). A exceção é o monitoramento de recursos orgânicos realizado concomitantemente a este, devido à forte influência na fauna de invertebrados.

made with caution. Furthermore, programs that use indicator species must consider rigorous and long-term protocols, even given the urgency with which conservation decisions must be made (Mcgeoch, 1998).

There is a clear difference in the parameters monitored in programs linked to environmental licensing processes in the two main iron regions in Brazil, but this difference is understandable. While community parameters are commonly monitored in the Quadrilátero Ferrífero region, state of Minas Gerais, the selection of potential indicator species has been used more in the Carajás region, state of Pará. Monitoring populations in the Quadrilátero Ferrífero region is made difficult by the smaller size of the caves and, consequently, rare cases of well-established populations in the cave environment. The Carajás region, on the other hand, has the largest iron caves in the world and species with large populations, often made up of dozens and even thousands of individuals. Recent studies carried out by Trevelin *et al.* (2018; 2021), allowed the identification of bioindicator species for caves in this region of the country.

Therefore, to define which environmental and ecological parameters should be evaluated in each cave monitoring program, the environmental and biological conditions of each cave, as well as the region where it is located, must be considered. Thus, a balance must always be sought between minimizing human effort and financial resources, as well as impacts in these environments, which may occur due to the need to incursion into these ecosystems and the performance of repeated sampling, as well as, and no less important, the acquisition of quality data. Thus, Table 2 presents recommendations for the use of the main parameters in invertebrate monitoring programs in iron caves.

2.2 Trophic dynamics

In addition to information about fauna, there are other parameters that need to be monitored since, as already mentioned, they significantly influence cave populations. These parameters are commonly part of monitoring programs and will be covered in specific chapters in this book (e.g., water and climate aspects). The exception is the concomitantly monitoring of organic resources, due to the strong influence on the invertebrate fauna.

Tabela 2: Parâmetros e medidas biológicas que podem ser obtidas a partir dos programas de monitoramento de fauna cavernícola: critérios e recomendações gerais e específicas.

Parâmetros	Medida biológica utilizada	Critérios e recomendações específicas	Critérios e recomendações gerais
Comunidades	• Riqueza (observada e estimada) • Número total de indivíduos • Diversidade beta (turnover) • Composição de espécies	• A periodicidade deve ser definida com cautela, uma vez que a avaliação destes parâmetros exige coleta de grande número de indivíduos.	• Devido as particularidades de cada caverna e espécie, a comparação temporal deve incluir análise individualizada (caverna a caverna / espécie a espécie). • Devem ser previamente estabelecidos os parâmetros a serem monitorados como preditores de possíveis mudanças na fauna. Estes devem ser selecionados considerando o tipo de alteração que se pretende avaliar.
Espécies indicadoras	• Abundância • Densidade relativa • Padrões de ocupação espacial (distribuição) • Movimentos individuais (deslocamentos) • Razão sexual	• A seleção das espécies deve considerar (minimamente): – Espécies de grupos taxonômicos já reconhecidos como bioindicadores. – Espécies com tamanho relativamente grande que permitam sua identificação em campo, sem necessidade de novas coletas de indivíduos. – Espécies abundantes, preferencialmente, com ampla distribuição. – Espécies pertencentes a grupos taxonômicos com poucos conflitos taxonômicos (e.g. crípticas). – Espécies com ciclos de vida curtos, podendo refletir mais rapidamente as modificações do ambiente na estrutura das populações.	

Table 2: Biological parameters and measurements that can be obtained from cave fauna monitoring programs: general and specific criteria and recommendations.

Parameters	Biological measure used	Specific criteria and recommendations	General criteria and recommendations
Communities	• Richness (observed and estimated) • Total number of individuals • Beta diversity (turnover) • Species composition	• Periodicity must be defined with caution, since the evaluation of these parameters requires collecting a large number of individuals.	• Due to the particularities of each cave and species, temporal comparisons must include individualized analyses (cave by cave / species by species). • The parameters to be monitored as predictors of possible changes in fauna must be previously established and selected considering the type of change to be evaluated.
Total number of individuals	• Abundance • Relative density • Patterns of spatial occupation (distribution) • Individual movements (displacements) • Sex ratio	• Species selection must minimally consider: Species of taxonomic groups already recognized as bioindicators. – Species of relatively large size that allows identification in the field, without the need for new collections of individuals. – Abundant species, preferably with wide distribution. – Species belonging to taxonomic groups with few taxonomic conflicts (e.g., cryptic). – Species with short life cycles, which can quickly reflect changes in the environment in the structure of populations.	

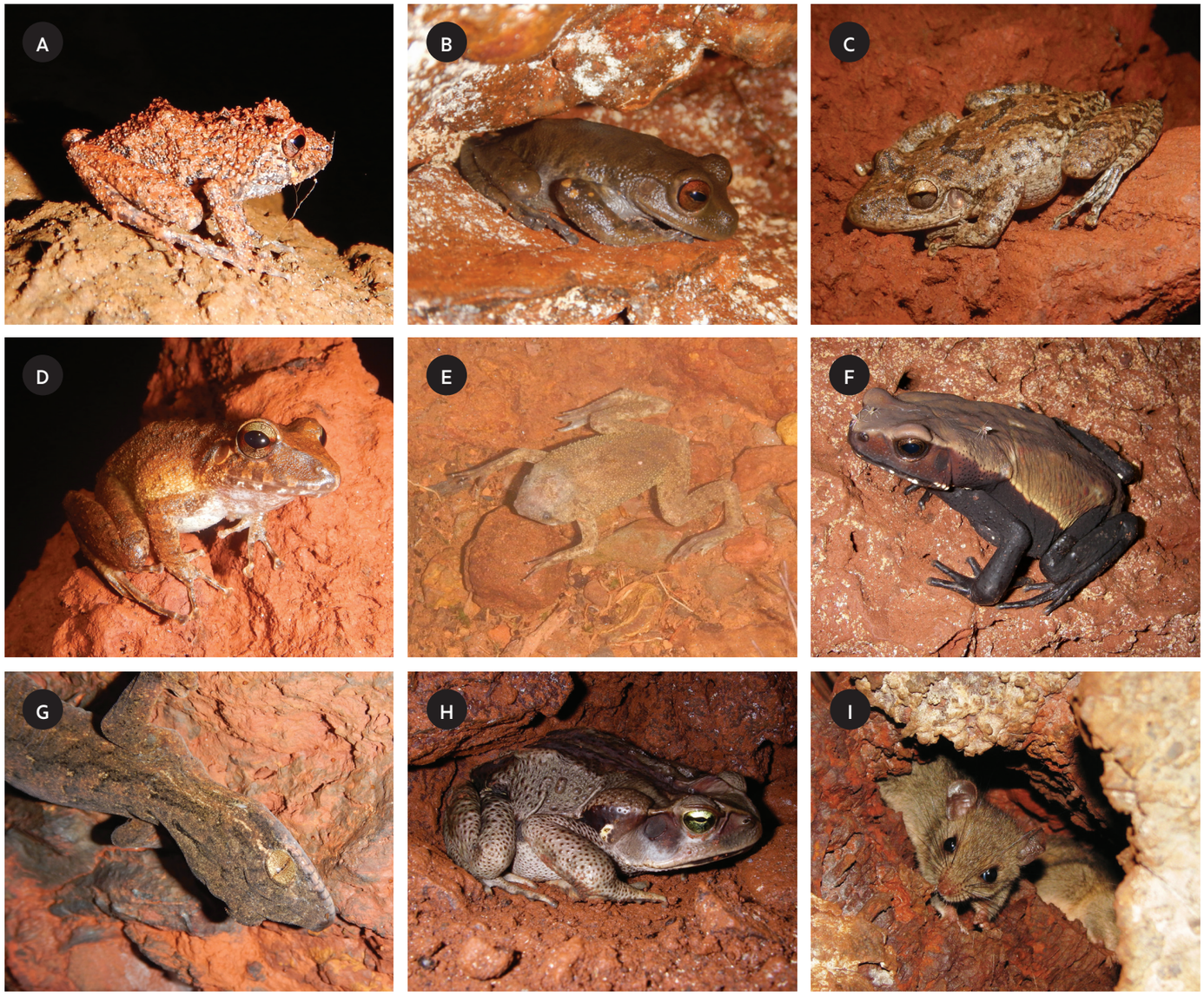


Figura 1: Exemplos de espécies de vertebrados não voadores monitoradas em cavernas ferríferas nas regiões de Carajás, estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. A) *Ischnocnema verrucosa* (Reinhardt & Lütken, 1862); B) *Bokermannohyla martinsi* (Bokermann, 1964); C) *Scinax fuscovarius* (Lutz, 1925); D) *Pristimantis fenestratus* (Steindachner, 1864); E) *Pipa arrabali* Izecksohn, 1976; F) *Rhaebo guttatus* (Schneider, 1799); G) *Thecadactylus rapicauda* (Houttuyn, 1782); H) *Rinella* sp.; I) *Rhipidomys* sp. Fotos A, D, E, G: Matheus H. Simões; B, C, F e H: Robson de A. Zampaulo; I: Xavier Prous.

Figure 1: Examples of non-flying vertebrate species monitored in iron caves in the regions of Carajás, state of Pará, and Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. A) *Ischnocnema verrucosa* (Reinhardt; Lütken, 1862); B) *Bokermannohyla martinsi* (Bokermann, 1964); C) *Scinax fuscovarius* (Lutz, 1925); D) *Pristimantis fenestratus* (Steindachner, 1864); E) *Pipa arrabali* Izecksohn, 1976; F) *Rhaebo guttatus* (Schneider, 1799); G) *Thecadactylus rapicauda* (Houttuyn, 1782); H) *Rinella* sp.; I) *Rhipidomys* sp. Photos A, D, E, G: Matheus H. Simões; B, C, F e H: Robson de A. Zampaulo; I: Xavier Prous.

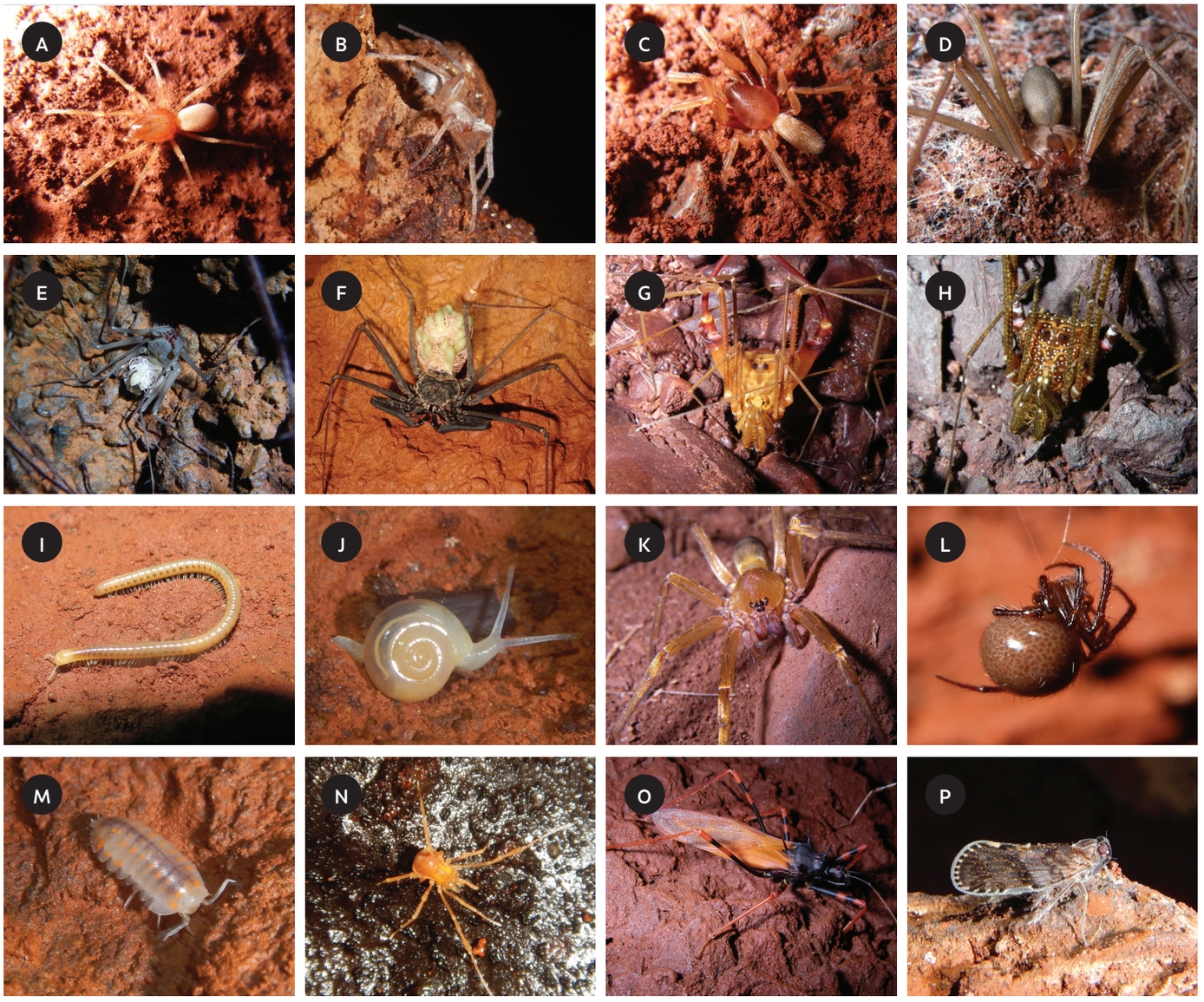


Figura 2: Exemplos de espécies de invertebrados terrestres monitoradas em cavernas ferríferas nas regiões de Carajás, estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. A) *Carajás paraua* Brescovit; Sánchez-Ruiz 2016; B) *Paracymbiomma* sp.; C) *Tsentinops mineiro* Brescovit; Sánchez-Ruiz 2016; D) *Loxosceles similis* (Moenkhaus, 1898); E) *Charinus ferreus* Giupponi; Miranda, 2016; F) *Heterophrynus longicornis* (Butler, 1873); G) *Goniosoma vatrax* Koch, 1848; H) *Mitogoniella indistincta* Mello-Leitão, 1936; I) *Pseudonannolene spelaea* Iniesta; Ferreira, 2013; J) Systrophiidae sp.; K) *Ctenus* sp.; L) *Plato novalima* Prete, Cizauskas; Brescovit, 2018; M) *Circoniscus carajasensis* Campos-Filho; Araujo, 2011; N) Escadabiidae sp.n; O) *Zelurus zikani* (Costa Lima, 1940); P) *Pintalia* sp.n. Fotos A, C, D, G, H, K, L, O: Robson de A. Zampaulo; B, E, J, M, N, P: Matheus h. Simões; F, I: Xavier Prous.

Figure 2: Examples of terrestrial invertebrate species monitored in iron caves in the regions of Carajás, state of Pará, and Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. A) *Carajás paraua* Brescovit; Sánchez-Ruiz 2016; B) *Paracymbiomma* sp.; C) *Tsentinops mineiro* Brescovit; Sánchez-Ruiz 2016; D) *Loxosceles similis* (Moenkhaus, 1898); E) *Charinus ferreus* Giupponi; Miranda, 2016; F) *Heterophrynus longicornis* (Butler, 1873); G) *Goniosoma vatrax* Koch, 1848; H) *Mitogoniella indistincta* Mello-Leitão, 1936; I) *Pseudonannolene spelaea* Iniesta; Ferreira, 2013; J) Systrophiidae sp.; K) *Ctenus* sp.; L) *Plato novalima* Prete, Cizauskas; Brescovit, 2018; M) *Circoniscus carajasensis* Campos-Filho; Araujo, 2011; N) Escadabiidae sp.n; O) *Zelurus zikani* (Costa Lima, 1940); P) *Pintalia* sp.n. Photos A, C, D, G, H, K, L, O: Robson de A. Zampaulo; B, E, J, M, N, P: Matheus h. Simões; F, I: Xavier Prous.

As cavernas, em geral, dependem de energia de origem alóctone, recebendo o fluxo primário de nutrientes por quatro tipos principais de agentes: água, movimento de animais, gravidade/vento e raízes das árvores no entorno (Culver; Pipan, 2009; Souza-Silva; Ferreira, 2022). O primeiro agente está associado à dinâmica hídrica da caverna; o segundo, à utilização do ambiente por espécies trogloxenas, temporárias e ou acidentais, e os demais são dependentes da vegetação do entorno.

A água realiza o transporte de nutrientes de duas maneiras principais: drenagens subterrâneas (temporários ou permanentes) ou águas de percolação. As drenagens disponibilizam maior quantidade de energia (Fong, 2019). Além disso, o carreamento, com o acúmulo de detritos nas partes mais profundas das cavernas torna-se um importante recurso para fauna (Oliveira *et al*., 2018; Simon; Benfield; Macko, 2003; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011b; Venarsky; Benstead; Huryn, 2012). Nos casos em que ocorrem pulsos de inundação com grande aporte de nutrientes, após a regressão da água, geralmente ocorre aumento na riqueza de espécies (Simões; Souza-Silva; Ferreira, 2015). Embora as águas de percolação transportem menor quantidade de nutrientes, estudos recentes têm demonstrado que este agente é importante por carrear quantidade significativa de carbono orgânico dissolvido (Simon; Pipan; Culver, 2007), além de organismos que vivem nas zonas de epicarste (Pipan; Culver, 2007). No entanto, pouco se conhece sobre a contribuição da matéria orgânica dissolvida (MOD) para a fauna subterrânea, sendo os estudos sobre o tema ainda pontuais, além de terem avaliado apenas a quantidade de nutrientes, sem relacionar este parâmetro com a fauna. Assim, monitoramentos tróficos, em geral, não precisam considerar estas fontes, a menos que seja identificada uma contribuição significativa para a dinâmica trófica da caverna.

O movimento de animais é outro importante fator que contribui para o fluxo energético em cavernas. Este agente pode ser dividido em dois grupos: i) visitantes ocasionais e ii) migrantes regulares (diários ou sazonais). Visitantes ocasionais, como algumas espécies de serpentes e pequenos mamíferos, contribuem para o ecossistema através do depósito de fezes e carcaças, ou seja, de forma mais pontual. Já os migrantes regulares podem ser os agentes mais importantes do sistema, principalmente pela deposição contínua de recursos orgânicos, como o guano e o regurgito, por exemplo. Cavernas podem abrigar grandes colônias de morcegos (migrantes diários) e aves

Caves, in general, depend on energy of allochthonous origin, receiving the primary flow of nutrients through four main types of agents: water, animal movement, gravity/wind and roots of surrounding trees (Culver; Pipan, 2009; Souza- Silva; Ferreira, 2022). The first agent is associated with cave water dynamics; the second, the use of the environment by trogloxene species, temporary and/or accidental; and the last two are dependent on the surrounding vegetation.

Water transports nutrients in two main ways: via underground drainage (temporary or permanent) or percolation. Drainage makes a greater amount of energy available (Fong, 2019) and results in the accumulation of debris in the deepest parts of caves, which becomes an important resource for fauna (Oliveira *et al*., 2018; Simon; Benfield; Macko, 2003; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011b; Venarsky; Benstead; Huryn, 2012). Flood pulses with a large input of nutrients generally result in increased species richness after water regression (Simões; Souza-Silva; Ferreira, 2015). Although percolation waters carry less nutrients, recent studies have demonstrated that this agent is important for carrying a significant amount of dissolved organic carbon (Simon; Pipan; Culver, 2007), in addition to organisms that live in epicarst zones (Pipan; Culver, 2007). However, little is known about the contribution of dissolved organic matter (DOM) to subterranean fauna, with studies on the subject still being sporadic and only evaluating the amount of nutrients, without relating this parameter to fauna. Therefore, trophic monitoring, in general, does not need to consider these sources, unless a significant contribution to the trophic dynamics of the cave is identified.

Animal movement is another important factor that contributes to energy flow in caves. This agent can be divided into two groups: i) occasional visitors and ii) regular migrants (daily or seasonal). Occasional visitors, such as some species of snakes and small mammals, contribute to the ecosystem through the deposit of feces and carcasses, that is, in a more occasional way. Regular migrants can be the most important agents in the cave system, mainly due to the continuous deposition of organic resources, such as guano and regurgitation, for example. Caves can harbor large colonies of bats (daily migrants) and birds (seasonal migrants), which can provide large amounts of food

(migrantes sazonais), que podem fornecer grande quantidade de recursos alimentares dentro das cavernas (Holland *et al*., 2009; Ladle *et al*., 2012; Price; Johnson; Clayton, 2004).

Apesar dos regurgitos não serem, de forma geral, abundantes e/ou recorrentes em cavernas inseridas na formação ferrífera, em cavernas carbonáticas corujas podem ocupar estes ambientes por longos períodos promovendo assim o acúmulo significativo deste recurso (Lund, 1950).

Depósitos de guano podem abrigar comunidades complexas e especializadas (Deharveng; Bedos, 2000; Ferreira, 2019a; Pellegrini; Ferreira, 2013). Dentre os invertebrados, algumas espécies de grilos e baratas em situações específicas também podem atuar como um importante agente na produção de matéria orgânica. Assim como os morcegos e as aves, são capazes de produzir quantidades expressivas de guano, como é o caso registrado na Mammoth Cave (Poulson, 1992), nos Estados Unidos. Este recurso é uma importante fonte de alimento para algumas espécies (Taylor; Krejca; Denight, 2005).

Por sua vez, a ação das correntes de ar e da gravidade promove o aporte de material vegetal e pequenos detritos orgânicos. Este aporte está condicionado a fatores intrínsecos das cavernas, como o tamanho e a posição das aberturas, bem como a fatores do ambiente externo como a produtividade e a estacionalidade climática da região onde a caverna está inserida. Um dos poucos estudos que testou a importância deste agente foi conduzido por Schneider *et al*. (2011), em 12 cavernas na região de West Virginia, USA. Após remover todo o material orgânico do piso de cavernas em locais com claraboias, realizou-se um experimento de enriquecimento trófico e foi observado que a adição de nutrientes foi determinante para a estrutura da comunidade de invertebrados. No Brasil, Souza-Silva e colaboradores (2013) utilizaram funis coletores de serrapilheira para avaliar o transporte de detritos vegetais pelo vento e pela gravidade em entradas verticais e horizontais de cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, estado de Minas Gerais. Em cavernas de pequenas dimensões, como aquelas associadas às formações ferríferas, este pode ser o principal recurso, sendo importante na composição e na riqueza de espécies (Zepon; Bichuette, 2017).

Outro agente que fornece energia de origem alóctone para cavernas são as raízes da vegetação de entorno. As raízes, normalmente, são observadas no teto e no piso das cavernas e, em geral, são mais comuns quando a caverna se desenvolve mais superficialmente. Em cavernas formadas por tubos de lava, por

resources within caves (Holland *et al*., 2009; Ladle *et al*., 2012; Price; Johnson; Clayton, 2004).

Although regurgitation is generally not abundant and/or recurrent in ferriferous caves, in limestone caves owls can occupy these environments for long periods, thus promoting a significant accumulation of this resource.

Guano deposits can house complex and specialized communities (Deharveng; Bedos, 2000; Ferreira, 2019a; Pellegrini; Ferreira, 2013). Among invertebrates, some species of crickets and cockroaches can, in specific situations, also act as important agents in the production of organic matter. Like bats and birds, are capable of producing significant amounts of guano. Such was the case recorded in Mammoth Cave (Poulson, 1992), in the United States. This resource can be an important source of food for some species (Taylor; Krejca; Denight, 2005).

In turn, the action of air currents and gravity promotes the supply of plant material and small organic debris. This contribution is conditioned by intrinsic factors of caves, such as the size and position of the openings, as well as external environmental factors such as productivity and climatic seasonality of the region where a cave is located. One of the few studies to test the importance of this agent was that of Schneider *et al*. (2011), in 12 caves in the West Virginia region, USA. These authors carried out a trophic enrichment experiment by removing all organic material from the caves, and observed that the addition of nutrients was decisive for the structure of the invertebrate community. In Brazil, Souza-Silva *et al*. (2013) used litter traps to evaluate the transport of plant debris by wind and gravity in vertical and horizontal entrances of quartzite caves in the Parque Estadual do Ibitipoca, state of Minas Gerais. In fact, this may be the main resource for small caves, such as those associated with iron formations, with important influences on species composition and richness (Zepon; Bichuette, 2017).

Another agent that supplies energy of allochthonous origin to caves are the roots of the surrounding vegetation. Roots are normally observed on the ceiling and floor of caves and, in general, are more common when the cave develops more

exemplo, as raízes podem ser a mais importante e, até mesmo, a única fonte de energia destes sistemas (Howarth, 1983) e suportam alta diversidade de organismos (Arechavaleta; Sala; Oromi, 1999; Ferreira, 2005; Howarth, 1983; Jasinska; Knott; Mccomb, 1996; Jasinska; Knott, 2000).

Apesar da maioria das vias tradicionais de aporte de nutrientes estarem presentes nas cavernas associadas às formações ferríferas (Ferreira, 2005), a dinâmica trófica nestes ambientes possui características particulares. Cavernas em minério de ferro, em geral, possuem dimensões menores quando comparadas a cavernas em outras litologias. Sendo assim, a parte acessível aos pesquisadores corresponde a uma área relativamente pequena e desenvolvida muito próximo da superfície. Estas características fazem com que a maior parte da área dessas cavernas recebam uma grande quantidade de luz solar, sendo comum a existência de uma grande quantidade de cavernas sem regiões afóticas (sem luz). Assim, é comum o crescimento de organismos fotossintetizantes e de raízes em seu interior. De fato, as raízes estão entre os recursos mais importantes em cavernas ferríferas, o que não é comum em outras litologias (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2015).

Outros recursos orgânicos recorrentes são as fezes de vertebrados e o material vegetal carreado do ambiente externo. Em geral, são comuns fezes de anuros e roedores, além do guano, que já possui relevância amplamente reconhecida. No entanto, não é comum esse tipo de recurso ser representado por depósitos volumosos, com a exceção de quando estão presentes grandes congregações de morcegos (e.g. espécies do gênero *Pteronotus* nas cavernas da região de Carajás) (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2015). Já o material vegetal está quase sempre presente e acumulado próximo das entradas e claraboias.

Nos programas de monitoramento, considera-se importante monitorar os substratos mais comuns e relevantes para fauna da caverna alvo. Portanto, é necessário um mapeamento detalhado destes recursos, bem como das suas vias de importação, além de uma avaliação qualitativa e quantitativa de cada recurso ao longo do tempo.

superficially. In caves formed by lava tubes, for example, roots can be the most important and even the only source of energy in these systems (Howarth, 1983), and support a high diversity of organisms (Arechavaleta; Sala; Oromi, 1999; Ferreira, 2005; Howarth, 1983; Jasinska; Knott; Mccomb, 1996; Jasinska; Knott, 2000).

Although most of the traditional routes of nutrient supply are present in caves associated with iron formations (Ferreira, 2005), the trophic dynamics in these environments has particular characteristics. Caves in iron ore generally have smaller dimensions than do caves in other lithologies. Therefore, the part accessible to researchers corresponds to a relatively small and developed area very close to the surface. These characteristics mean that majority of the area of these caves receive a large amount of sunlight, and it is common for there to be many caves without aphotic (without light) regions. Thus, the growth of photosynthetic organisms and roots inside is common. In fact, roots are among the most important resources in iron caves, which is not common in other lithologies (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2015).

Other recurring resources include vertebrate feces and plant material carried from the external environment. In general, anuran and rodent feces are common, in addition to guano, the relevance of which is already widely recognized. However, it is not common for this type of resource to be represented by voluminous deposits, except for when large congregations of bats are present (e.g., species of the genus *Pteronotus* in caves of the Carajás region) (Ferreira; Oliveira; Souza-Silva, 2015). Plant material is almost always present and accumulated near cave entrances.

It is considered important that monitoring programs include the most common and relevant substrates for cave fauna. Therefore, a detailed mapping of these resources, as well as their import routes, is necessary, in addition to qualitative and quantitative assessments of each resource over time.



Figura 3: Recursos orgânicos frequentemente monitorados em cavernas ferríferas das regiões de Carajás, estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. A, E, J) Material vegetal e organismos fotossintetizantes em regiões de entrada; B,F,K) Raízes e rizotema; C) Guano de morcego frugívoro; D) Invertebrados em local com disponibilidade de raiz e guano de morcego hematófago; G) Larvas de dípteros se alimentando em carcaça de morcego; H) Grilos *Phalangopsis ferratilis* se alimentando em carcaça de morcego; I) Larvas de Coleoptera se alimentado em carcaça de roedor; L) Fezes de mamífero; M) Bolota de regurgito de coruja (egagrópila). Fotos: A, B, D, E, G, I, J, K, L e M: Matheus H. Simões; H e M: Robson de A. Zampaulo; C e F: Xavier Prous.

Figure 3: Organic resources frequently monitored in iron caves in the regions of Carajás, state of Pará, and Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. A, E, J) Plant material and photosynthetic organisms in input regions; B–F–K) roots and rhizothemes; C) Frugivorous bat guano; D) Invertebrates in a place with availability of roots and hematophagous bat guano; G) Diptera larvae feeding on a bat carcass; H) Crickets (*Phalangopsis ferratilis*) feeding on a bat carcass; I) Coleoptera feeding on a rodent carcass; L) Mammal feces; M) Owl regurgitation (egagropila). Photos: A, B, D, E, G, H, I, J, K, L: Matheus H. Simões; H, M: Robson de A. Zampaulo; C, F: Xavier Prous.

3 COMO MONITORAR

3.1 Métodos para amostragem da fauna em programas de monitoramento

Ao longo dos anos, diferentes métodos têm sido empregados para amostragem da fauna cavernícola. Em inventários, a combinação dessas técnicas, principalmente em cavernas maiores e mais complexas, potencializa a descoberta de espécies e o aumento da riqueza observada (Weinstein; Slaney, 1995; Wynne *et al.*, 2018). De fato, em inventários faunísticos, a maioria dos estudos utiliza diferentes métodos de amostragem para conseguir registrar o maior número de espécies possível (Wynne *et al.*, 2019).

Recentemente, Wynne *et al.* (2019) realizaram revisão dos métodos historicamente empregados para amostragem da fauna em cavernas. Em aproximadamente 300 trabalhos, eles conseguiram encontrar dezenas de estratégias, dentre métodos de coleta ativa (e.g. amostragem manual) e passiva (e.g. armadilhas, extração de substratos, iscas atrativas). A busca visual, armadilhas do tipo *pitfall* e remoção de substratos foram os métodos mais comuns nos estudos avaliados.

Embora os métodos supracitados sejam os mais comuns, quando o objetivo é monitorar a fauna de invertebrados nem todos são recomendáveis. Segundo Culver; Sket (2002), o primeiro passo para definir como monitorar a fauna cavernícola é considerar a diversidade ecológica que existe no ambiente. Como programas de monitoramento têm amostragens recorrentes, alguns métodos podem ser prejudiciais para determinados grupos de espécies. A remoção de substratos, a utilização de iscas e *pitfall*, por exemplo, além da seletividade de espécies capturadas, podem sacrificar muitos indivíduos e, no longo prazo, isso pode ser mais prejudicial para a fauna do que o próprio impacto das alterações no entorno da caverna cujo estudo pretende avaliar.

Outro fator importante na determinação de qual método utilizar para monitorar invertebrados são as características das cavernas. As cavernas ferríferas são menores quando comparadas a outros tipos de rochas (Calux; Cassimiro; Salgado, 2019), com apenas uma pequena parcela ultrapassando 100 metros de comprimento (Auler *et al.*, 2022). Além disso, do ponto de vista biológico os parâmetros de riqueza e composição de espécies são significativamente distintos das demais litologias (Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a). Assim, embora o conhecimento gerado a partir de estudos em outras litologias deva ser utilizado como referência, as melhores práticas para estudos com fauna de cavernas ferríferas no Brasil ainda estão em desenvolvimento.

3 HOW TO MONITOR

3.1 Methods for sampling fauna in monitoring programs

Different methods have been used to sample cave fauna over the years. For inventories, especially in larger and more complex caves, the combination of these techniques enhances the discovery of species and so increases the observed richness (Weinstein; Slaney, 1995; Wynne *et al.*, 2018). In fact, most faunal inventories use a variety of sampling methods to record as many species as possible (Wynne *et al.*, 2019).

Recently, Wynne *et al.* (2019) carried out a review of the methods historically used for sampling cave fauna. Their search of approximately 300 works found dozens of strategies, including active (e.g., manual sampling) and passive (e.g., traps, substrate extraction, attractive baits) sampling methods. Visual search, *pitfall* traps and substrate removal were the most common methods in the evaluated studies.

Although the aforementioned methods are the most common, not all of them are recommended when the objective is to monitor the invertebrate fauna. According to Culver; Sket (2002), the first step in determining how to monitor cave fauna is to consider the ecological diversity that exists in the environment. As monitoring programs have recurrent sampling, some methods can be harmful to certain groups of species. The removal of substrates and the use of bait and *pitfall* traps, for example, are selective to the captured species and can sacrifice many individuals, which, in the long term, can be more harmful to the fauna than the impact of changes in the surroundings of the cave being evaluated.

Another important factor in determining which method to use to monitor invertebrates is the characteristics of the caves themselves. Iron caves are smaller than those in other types of rocks (Calux; Cassimiro; Salgado, 2019), with only a small portion exceeding 100 meters in length (Auler *et al.*, 2022). Furthermore, from a biological point of view, the parameters of species richness and composition differ significantly from other those for caves in other lithologies (Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a). Thus, although the knowledge generated from studies in other lithologies should be used for as a reference, best practices for studies of ferriferous cave fauna in Brazil are still being developed.

Como já mencionado, os principais programas de monitoramento realizados nas cavernas ferríferas brasileiras foram ou estão sendo realizados nas regiões de Carajás, estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. Para construção deste capítulo foram utilizados os estudos que são conduzidos em áreas da Vale S.A. nestas regiões. A seguir, serão apresentados os métodos e alguns dos resultados obtidos e que podem ser utilizados como boas práticas em outros programas, incluindo em cavernas de outras litologias.

3.2 Monitoramentos na região de Carajás

Na região de Carajás existem dois programas de monitoramento com maior espaço temporal e resultados mais robustos, ambos conduzidos na Floresta Nacional de Carajás, unidade de conservação de uso sustentável, criada para compatibilizar a exploração das jazidas minerais com a conservação do meio ambiente (Brasil, 1998). O primeiro estudo foi iniciado em 2014 na região denominada como Serra Sul, no município de Canaã dos Carajás, e engloba 90 cavernas na área de implantação do denominado Projeto S11D, e outras seis em áreas preservadas (Ativo Ambiental, 2019; Brandt, 2021; Ecossistema, 2015). O segundo estudo tem sido conduzido desde 2015 na região da Serra Norte, município de Parauapebas, e contempla 51 cavernas na região do projeto Ferro Carajás Minas N4 e N5 (Ativo Ambiental, 2019; Brandt, 2021). A seguir, serão detalhados o histórico metodológico e os aprendizados obtidos com os dois programas.

No programa de monitoramento conduzido em Serra Sul, inicialmente (2014–2015) foi utilizada a metodologia de busca ativa visual combinada ao método de quadrantes (1 m x 5m), limitada por tempo (30 min/quadrante). As campanhas eram semestrais e os quadrantes foram definidos de acordo com o tamanho e as características da caverna, selecionando locais em função da disponibilidade de substratos ou micro-habitats (Ecossistema, 2015). A delimitação por área (quadrantes) e tempo pode não ser adequada para cavernas ferríferas, devido às pequenas dimensões, e em programas de monitoramento, pois pode comprometer as análises da relação entre as mudanças no ambiente e e as dinâmicas populacionais e de comunidades. Mesmo em inventários (diagnósticos), estudos recentes demonstraram que esta metodologia diminui significativamente o número de espécies e indivíduos observados quando comparada ao método de busca ativa detalhada por toda a caverna, principalmente em cavernas ferríferas (Oliveira, 2015). Além disso, a amostragem localizada apenas nas áreas dos

As already mentioned, the main monitoring programs in Brazilian iron caves have been, and are, being carried out in the regions of Carajás, state of Pará, and Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais. This chapter was developed using studies conducted in areas of Vale S.A. in these regions. The methods and some of the results obtained from these studies, and which can be used as good practices in other programs, including caves of other lithologies, will now be presented.

3.2 Monitoring in the Carajás region

There are two monitoring programs in the Carajás region with longer durations and more robust results, both conducted in the Floresta Nacional de Carajás, a sustainable use conservation unit created to make the exploration of mineral deposits compatible with environmental conservation (Brazil, 1998). The first study began in 2014 in the region known as Serra Sul, in the municipality of Canaã dos Carajás, and includes 90 caves in the area where the S11D Project was implemented, and another six in preserved areas (Ativo Ambiental, 2019; Brandt, 2021; Ecossistema, 2015). The second study began in 2015 in the Serra Norte region, municipality of Parauapebas, and includes 51 caves in the Ferro Carajás Minas N4 and N5 project region (Ativo Ambiental, 2019; Brandt, 2021). The methodological history and lessons learned from both programs are detailed below.

The monitoring program conducted in Serra Sul initially (2014–2015) employed the active visual search methodology, combined with the quadrant method (1 m x 5 m), limited by time (30 min/quadrant). The campaigns were biannual, and the quadrants were defined according to the size and characteristics of each cave, selecting locations based on the availability of substrates or microhabitats (Ecosistema, 2015). Delimitation by area (quadrants) and time may not be appropriate for ferriferous caves due to their small dimensions, as this may compromise analyses of the relationship between changes in the environment and population and community dynamics. Even for inventories (diagnoses), recent studies have demonstrated that this methodology significantly reduces the number of species and individuals observed when compared to the method of detailed active search throughout a cave, mainly in iron caves (Oliveira, 2015). Furthermore, restricting sampling to areas of quadrants will prevent patterns of species distribution in the

quadrantes impedirá que os padrões de distribuição das espécies no ambiente sejam percebidos e analisados ao longo do tempo, como será apresentado mais adiante.

Em 2016, este programa em Serra Sul sofreu adequações e a amostragem da fauna de invertebrados passou a ser realizada com o método de busca ativa visual por toda a extensão das cavernas, sendo este método utilizado desde então. Além disso, o monitoramento passou a focar em espécies alvo potenciais indicadoras de alterações no ambiente. Assim, os principais parâmetros da fauna avaliados passaram a ser a abundância populacional e a ocupação das espécies no ambiente subterrâneo (Ativo Ambiental, 2019). Embora os estudos ainda sejam de curto e médio prazos (máximo cinco anos), a eficiência dessa metodologia foi testada recentemente e os resultados mostraram-se satisfatórios, possibilitando, inclusive, a identificação de espécies sensíveis (indicadoras) às alterações antrópicas estabelecidas no entorno das cavernas na área licenciada do empreendimento (Trevelin *et al.*, 2021).

Na região de Serra Norte, o monitoramento da fauna de invertebrados teve início em 2015 já com a metodologia de busca ativa por toda a caverna e com a seleção de espécies alvo. Neste caso, as principais mudanças no programa foram em relação à frequência de amostragem. O estudo, inicialmente, considerava amostragens trimestrais (2015–2017) e após esse período passaram a ser semestrais (2018–atual) (Brandt, 2021). A mudança ocorreu em função da alta frequência de incursões nas cavernas para a execução dos monitoramentos e o risco efetivo destas incursões causarem impactos na fauna. Vale lembrar que, além do monitoramento de invertebrados, também ocorrem outros programas, tais como: microclima, hidrológico, geomorfológico estrutural, fotográfico e sismológico. Assim, os programas de monitoramento devem sempre buscar o equilíbrio na frequência das amostragens e a premissa do mínimo impacto, como será discutido mais adiante.

3.3 Monitoramentos na região do Quadrilátero Ferrífero

Por sua vez, na região do Quadrilátero Ferrífero os programas de monitoramento são mais recentes e devido às menores dimensões das cavernas, quando comparadas às de Carajás (Auler, *et al.*, 2021), são conduzidos com algumas diferenças metodológicas. Um exemplo é o estudo que tem sido realizado desde 2019 em cinco cavernas na região da Cava da Divisa, Mina de Brucutu, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo (Spelayon, 2022). A metodologia de amostragem é a busca ativa visual por toda a extensão das cavernas. No entanto, a

environment from being perceived and analyzed over time, as will be presented later.

This program in Serra Sul underwent adjustments in 2016, and sampling of the invertebrate fauna began to use the active visual search method throughout the entire length of the caves, which has been used since. Furthermore, monitoring began to focus on target species that are potential indicators of changes in the environment. Thus, the main fauna parameters evaluated became population abundance and species occupation in the subterranean environment (Ativo Ambiental, 2019). Although the studies are still short- and medium-term (maximum five years), the efficiency of this methodology was recently tested and found to have satisfactory results, even enabling the identification of species sensitive (indicators) to anthropogenic changes established around the caves in the project's licensed area (Trevelin *et al.*, 2021).

Monitoring of the invertebrate fauna in the Serra Norte region began in 2015 employing the methodology of active search throughout the cave and the selection of target species. In this case, the main changes to the program were in relation to the sampling frequency. The study initially considered quarterly samples (2015–2017), after which they became semi-annual (2018–current) (Brandt, 2021). The change was due to the high frequency of incursions into caves for monitoring and the effective risk of these incursions for causing impacts on fauna. It is worth remembering that, in addition to monitoring invertebrates, other programs also take place, such as microclimatic, hydrological, structural geomorphological, photographic and seismological investigations. Therefore, monitoring programs must always seek a balance between sampling frequency and the premise of minimum impact, as will be discussed later.

3.3 Monitoring in the Quadrilátero Ferrífero region

In turn, monitoring programs have been more recent in the region of the Quadrilátero Ferrífero and, due to the smaller dimensions of the caves compared to those in Carajás (Auler, *et al.*, 2021), are conducted with some methodological differences. An example is a study that has been carried out since 2019 in five caves in the Cava da Divisa region, Mina de Brucutu, in the municipality of São Gonçalo do Rio Baixo (Spelayon, 2022). The sampling methodology employed is active visual search

amostragem considera primordialmente toda a comunidade de invertebrados, uma vez que populações estabelecidas e com grande número de indivíduos são raras. Apenas para as duas maiores cavernas é realizado o monitoramento de populações, tendo sido selecionadas cinco espécies (três de aranhas e duas de grilos). Adicionalmente, para as espécies selecionadas foi utilizada a marcação de indivíduos para a estimativa do tamanho das populações, da sazonalidade e da distribuição espacial e temporal. No entanto, o sucesso das recapturas foi baixo e a metodologia não tem sido mais utilizada.

O monitoramento populacional na Cava da Divisa tem se mostrado eficaz, uma vez que foi possível identificar variáveis externas que influenciam a abundância. Por exemplo, a espécie de aranha *Loxosceles similis* (Moenkhaus, 1898) é positivamente correlacionada com a temperatura externa. Assim, caso as alterações no ambiente do entorno das cavernas promovam o ressecamento e, consequentemente, o aumento da temperatura, as populações subterrâneas dessa espécie irão aumentar, indicando o impacto sobre o ecossistema. Este resultado mostra também que em cavernas pequenas e sem grandes populações, o monitoramento de parâmetros abióticos pode indiretamente ser utilizado para aferir a qualidade do ambiente subterrâneo para o estabelecimento de espécies.

Conforme apresentado acima, os métodos utilizados na amostragem da fauna em cavernas ferríferas, tanto em inventários quanto em monitoramentos (Figura 4 e Figura 5), possuem pontos positivos e negativos (Tabela 3). Sendo assim, a escolha do método adequado é primordial para alcançar efetivamente os objetivos dos programas de monitoramento que são: identificar padrões ecológicos, monitorá-los ao longo do tempo, verificar se as alterações no entorno provocaram mudanças nas populações ou nas comunidades de forma geral e intervir para que os impactos não se tornem irreversíveis.

3.4 Busca ativa e plotagem de indivíduos: quais as vantagens?

O método de busca ativa associado à plotagem de indivíduos tem sido amplamente empregado em programas de monitoramento de cavernas ferríferas no Brasil, principalmente aqueles vinculados a processos de licenciamento ambiental. Este método consiste em realizar buscas visuais em diferentes micro-habitats ao longo de toda a extensão da caverna. Cada indivíduo tem sua posição plotada no mapa topográfico da caverna, permitindo a visualização da distribuição espacial e a contagem da abundância populacional. Quando detectado mais de um

throughout the entire length of the caves. However, sampling primarily considers the entire invertebrate community, since established populations with a large number of individuals are rare. Population monitoring is carried out only for the two largest caves, for which five species were selected (three spiders and two crickets). Additionally, individuals of the selected species are marked to allow population size, seasonality and spatial and temporal distribution to be estimated. However, recapture success was low, and so the methodology is no longer being used.

Population monitoring in Cava da Divisa has proven to be effective, as it was possible to identify external variables that influence abundance. For example, the abundance of the spider species *Loxosceles similis* (Moenkhaus, 1898) is positively correlated with external temperature. Thus, if changes in the environment surrounding the caves promote drying and, consequently, an increase in temperature, the subterranean populations of this species will increase, indicating an impact on the ecosystem. This result also shows that for small caves without large populations, monitoring abiotic parameters can be used to indirectly assess the quality of the subterranean environment for the establishment of species.

As shown above, the methods used to sample fauna in iron caves, both for inventories and monitoring (Figure 4 and Figure 5), have positive and negative aspects (Table 3). Therefore, the choice the appropriate method is essential to effectively achieve the objectives of monitoring programs, which are: the identification of ecological patterns; monitoring these patterns over time; determining whether changes in the environment have caused changes in populations or communities in general; and intervening so that the impacts do not become irreversible.

3.4 Active search and plotting of individuals: what are the advantages?

The active search method associated with plotting individuals has been widely used in ferriferous cave monitoring programs in Brazil, especially those linked to environmental licensing processes. This method consists of carrying out visual searches in different microhabitats throughout the entire length of the cave. Each found individual has its position plotted on a topographic map of the cave, allowing visualization of spatial distribution and counting of population abundance. When more than one specimen of the species is detected at

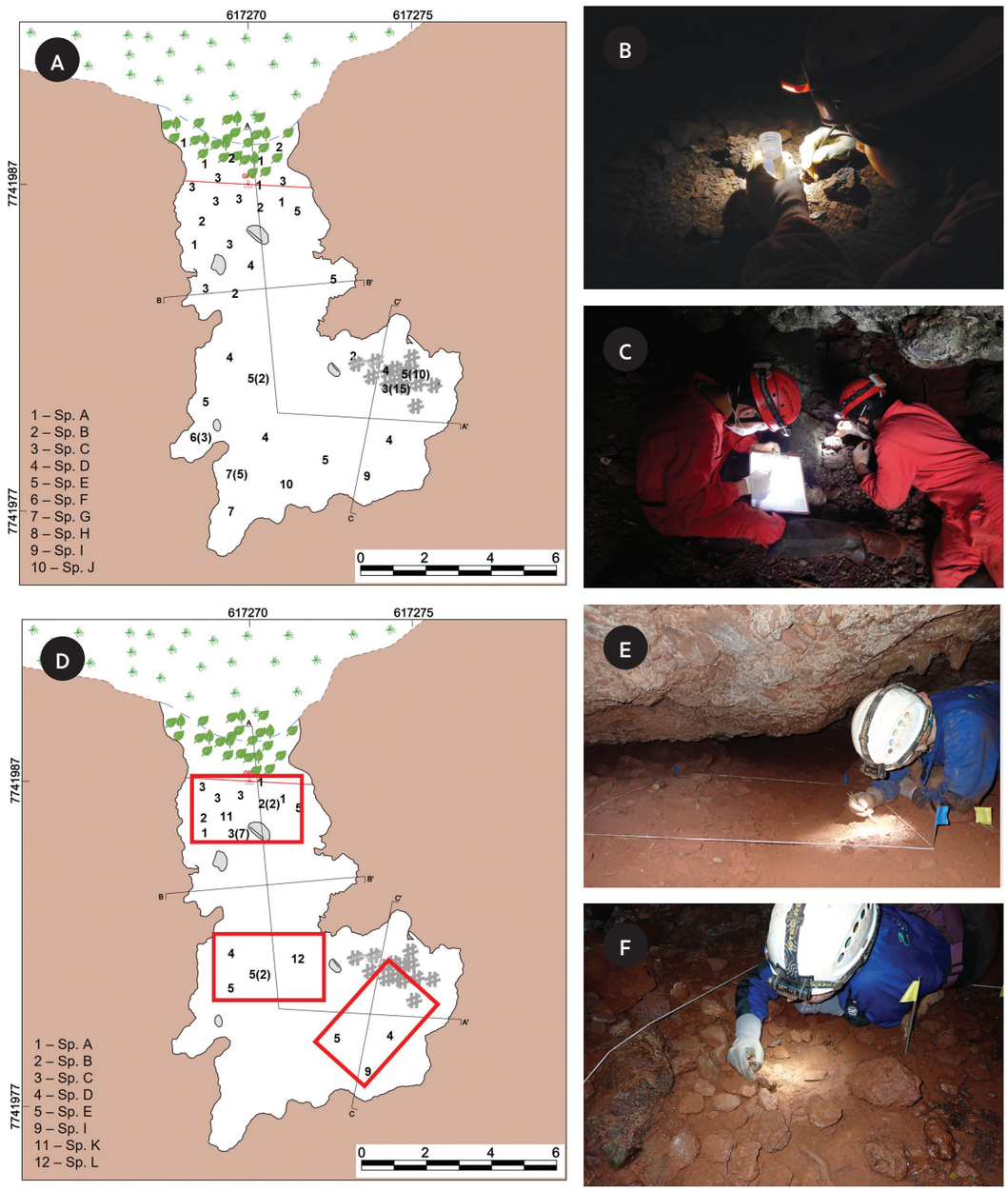


Figura 4: Dois dos principais métodos de coleta ativa utilizados em programas de monitoramento da fauna cavernícola. A–C) Busca ativa visual por toda a extensão da caverna, associada à plotagem de indivíduos (Ferreira, 2004); D–F) Busca ativa visual limitada por quadrantes pré-definidos. Os números indicam, hipoteticamente, diferentes espécies e mostram que os métodos são capazes de registrar espécies exclusivas e que podem registrar abundâncias distintas. Fotos: B–C: Matheus H. Simões; E–F: BioEspeleo Consultoria.

Figure 4: Two of the main active sampling methods employed by cave fauna monitoring programs. A–C) Active visual search throughout the entire extension of the cave, associated with the plotting of individuals (Ferreira, 2004); D–F) Visual active search limited by pre-defined quadrants. The numbers hypothetically indicate different species and show that the methods are capable of recording exclusive species and different population abundances. Photos: B–C: Matheus H. Simões; E–F: BioEspeleo Consultoria.

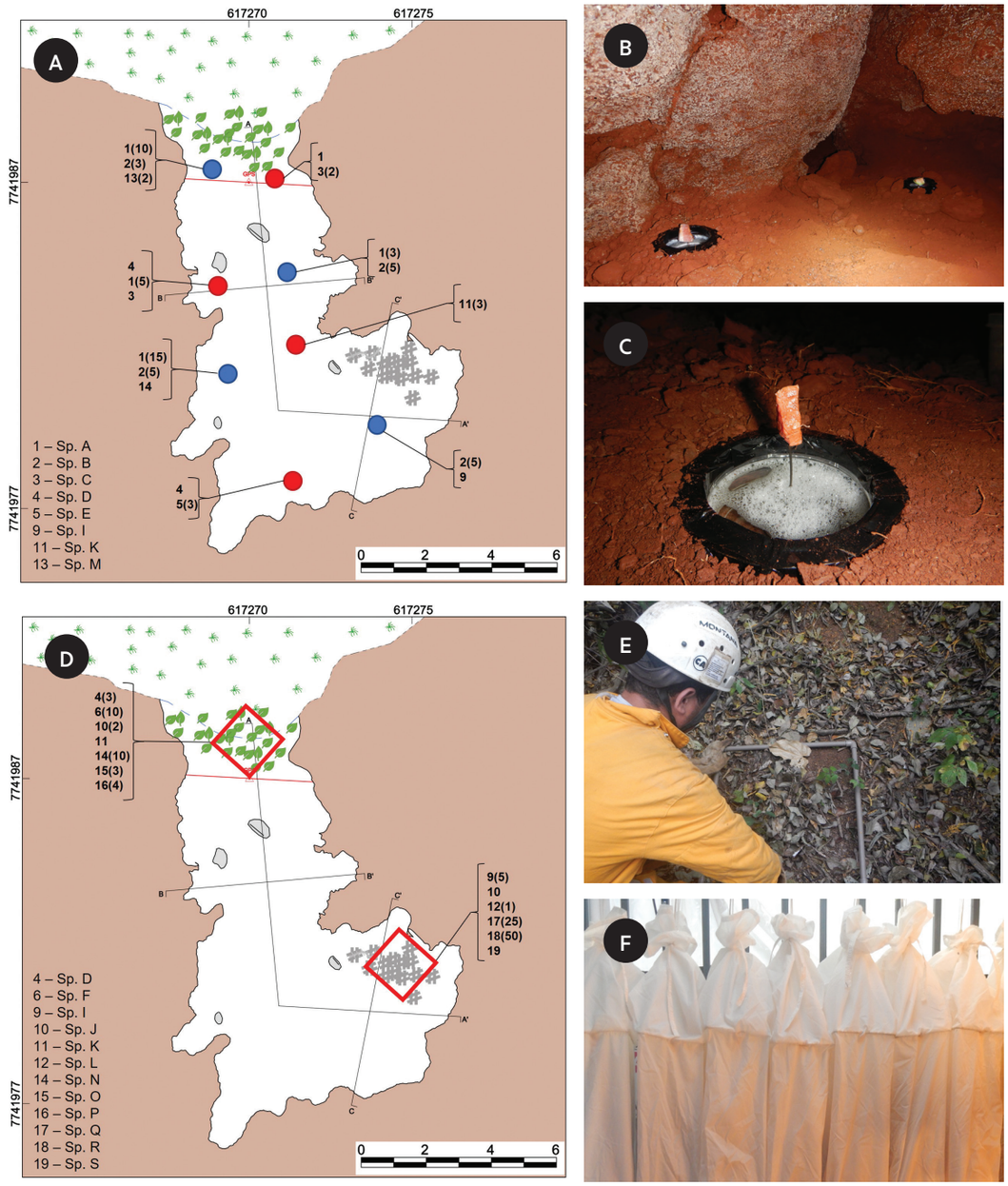


Figura 5: Dois dos principais métodos de coleta passiva utilizados em programas de monitoramento da fauna cavernícola. A-C) Uso de armadilhas tipo *pitfall* com iscas atrativas; D-F) Remoção de substratos orgânicos e posterior utilização de coletores (e.g. Funil de Berlese e Extrator de Winkler). Os números indicam, hipoteticamente, diferentes espécies e mostram que os métodos são capazes de registrar espécies exclusivas e com abundâncias distintas. Fotos: Matheus H. Simões

Figure 5: Two of the main passive sampling methods employed by cave fauna monitoring programs. A-C) Use of pitfall traps with attractive baits; D-F) Removal of organic substrates and subsequent use of collectors (e.g., Berlese Funnel and Winkler Extractor). The numbers hypothetically indicate different species and show that the methods are capable of recording exclusive species and different population abundances. Photos: Matheus H. Simões.

Tabela 3: Quatro dos principais métodos de amostragem da fauna que podem ser utilizados em programas de monitoramento e sinalização dos principais pontos positivos e negativos, considerando estudos em cavernas ferríferas.

Método	Descrição	Pontos positivos	Pontos negativos
Busca visual por toda a caverna	• Buscas visuais nos micro-habitats (espaços sob rochas, pequenas fendas, solo úmido, espeleotemas etc.) e depósitos orgânicos (serapilheira, troncos, carcaças, guano etc.).	• Coleta de maior diversidade de grupos taxonômicos e com diferentes estratégias de vida. • Possibilidade de identificar o local aproximado de coleta do indivíduo.	• Necessário experiência do coletor para encontrar maior diversidade de espécies. • Baixa eficiência em locais com acúmulo de substratos orgânicos (e.g. guano, serrapilheira) ou grande quantidade de blocos ou canalículos. • Baixa eficiência em corpos d'água. • Difícil padronização. • Pisoteamento dos substratos (orgânicos e inorgânicos) da caverna. • Perturbação no ambiente cavernícola.
Busca visual em quadrantes pré-definidos	• Buscas visuais concentradas em quadrantes pré-definidos. Este método pode ser usado com ou sem a limitação de tempo.	• Riqueza e abundância mais refinadas na área amostrada. • Maior padronização da área e tempo de amostragem. • Menor pisoteamento da caverna. • Menor perturbação no ambiente cavernícola.	• Resultados de diversidade restritos as áreas definidas (aleatoriamente ou não) para instalação dos quadrantes • Método seletivo que amostra uma parcela menor da comunidade. • Baixa eficiência em locais com acúmulo de substratos orgânicos (e.g. guano, serapilheira).
Armadilhas tipo *"pitfall"*	• Instalação de frascos ou tubos no piso da caverna, com ou sem isca atrativa e líquido conservante, deixadas por tempo pré-determinado.	• Coleta de espécies com maior capacidade locomotora e que usam habitats inacessíveis ao homem. • Menor perturbação no ambiente cavernícola.	• Maior eficiência para espécies detritívoras, comparado aos outros métodos. • Alta seletividade de espécies. • Coleta de um elevado número de indivíduos. • Dificulta análises ecológicas. • Pode impactar a fauna em coletas recorrentes ou pelo uso de iscas atrativas.
Remoção de substratos	• Remoção de substratos orgânicos (e.g. guano e serapilheira) com posterior utilização de extratores (e.g. Funil de Berlese e Extrator de Winkler).	• Coleta de espécies de difícil detecção visual. • Contagem mais precisa da abundância. • Menor perturbação no ambiente cavernícola por estar concentrado em algumas áreas das cavernas.	• Maior eficiência para espécies detritívoras, comparado aos outros métodos. • Pode impactar a fauna em coletas recorrentes por coletar elevado número de indivíduos e diminuir a disponibilidade de matéria orgânica no interior das cavernas.

Table 3: Four of the main fauna sampling methods that can be used in monitoring programs and the main positive and negative points, considering studies in iron caves.

Method	Description	Positive points	Negative points
Visual search throughout cave	• Visual searches in microhabitats (spaces under rocks, small crevices, moist soil, speleothems, etc.) and organic deposits (litter, logs, carcasses, guano, etc.).	• Collection of greater diversity of taxonomic groups and with different life strategies. • Possibility of identifying an individual's approximate collection location.	• Collector experience is necessary to find greater species diversity. • Low efficiency in places with accumulation of organic substrates (e.g. guano, leaf litter) or large amounts of blocks or canaliculi. • Low efficiency in water bodies. • Difficult to standardize. • Trampling of substrates (organic and inorganic) in the cave. • Disturbance of cave environment.
Visual search in pre-defined quadrants	• Visual searches concentrated in pre-defined quadrants. Can be used with or without the time limitation.	• More refined richness and abundance in the sampled area. • Greater standardization of the sampling area and time. • Less trampling of cave. • Less disturbance of cave environment.	• Diversity results restricted to areas defined (randomly or not) for quadrant installation. • Selective method that records a smaller portion of the community. • Low efficiency in places with accumulation of organic substrates (e.g. guano, leaf litter).
Pitfall traps	• Installation of bottles or tubes on the cave floor, with or without attractive bait and preservative liquid, left for a predetermined time.	• Collection of species with greater locomotor capacity and that use habitats inaccessible to humans. • Less disturbance of cave environment.	• Greater efficiency for detritivorous species, compared to other methods. • High species selectivity. • Collecting a large number of individuals. • Makes ecological analysis difficult. • Can impact fauna in recurring collections or through the use of attractive baits.
Substrate removal	• Removal of organic substrates (e.g. guano and leaf litter) with subsequent use of extractors (e.g. Berlese Funnel and Winkler Extractor).	• Collection of species that are difficult to detect visually. • More accurate abundance count. • Less disturbance to cave environment as it is concentrated in some areas of the caves.	• Greater efficiency for detritivorous species, compared to other methods. • Can impact fauna in recurrent collections by collecting high numbers of individuals and reducing the availability of organic matter inside the caves.

exemplar da espécie no mesmo ponto de coleta, a quantidade de indivíduos é plotada entre parênteses. A Figura 4 apresenta um esquema que ilustra a aplicação do método.

Em estudo realizado em cavernas de diferentes litologias, incluindo as ferríferas, Oliveira (2014) avaliou a efetividade de diferentes métodos de coleta na amostragem da fauna de invertebrados. Como resultado, observou que o método de busca ativa foi o mais eficiente em amostrar a riqueza estimada. De fato, esse método tem sido, historicamente, mais empregado nos estudos da fauna cavernícola brasileira (Bento *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2015; Ferreira; Pellegrini, 2019; Paixão, E.; Ferreira; Paixão, C., 2017; Pellegrini; Ferreira, 2016; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a; Souza-Silva; Iniesta; Ferreira, 2020). Adicionalmente, a plotagem de indivíduos, método desenvolvido por Ferreira (2004) em sua tese de doutorado, foi mais eficiente quando comparado a outros métodos de busca ativa. No entanto, vale ressaltar que este método possui restrições em relação à viabilidade de identificação das espécies em campo, e a qualidade do resultado é dependente da experiência da equipe que está executando-o. Sendo assim, este método obviamente é recomendado para espécies de fácil identificação em campo e que não dependam da visualização de caracteres taxonômicos distinguíveis apenas em laboratório com o auxílio de lupas (estereomicroscópios) ou microscópios.

Este método é particularmente usual em monitoramentos da fauna terrestre, pois, além de registrar as espécies e suas abundâncias, possibilita observar as zonas de ocupação e movimentos das populações no interior das cavernas. Ferreira e colaboradores (2015), estudando uma espécie de mariposa (Noctuidae, *Hypena*), observaram que as zonas de ocupação da caverna por indivíduos mudam sob influência de fatores externos relacionados à sazonalidade (temperatura e umidade) e aos períodos de seca e chuva. Resultados semelhantes foram observados para duas espécies de grilo (*Endecous aguassay* e *Eidmanacris lencionii*) (Paixão, E.; Ferreira; Paixão, C., 2017). Este mesmo estudo descreve a possibilidade de flutuações e deslocamentos populacionais serem influenciados pela competição que existe entre essas espécies.

Resultados preliminares dos programas de monitoramento realizados na região da Serra dos Carajás, coordenados pelos autores deste capítulo, também mostram padrões de ocupação e flutuações populacionais para algumas espécies. Estes resultados são influenciados, principalmente, pela sazonalidade e pelas mudanças climáticas que ocorrem anualmente (e.g.

the same collection point, the number of individuals is plotted in parentheses. Figure 4 presents a diagram that illustrates the application of the method.

Oliveira (2014) evaluated the effectiveness of different sampling methods in sampling invertebrate fauna in caves of different lithologies, including iron caves, and found the active search method to be the most efficient in sampling estimated richness. In fact, this method has historically been the most used in studies of Brazilian cave fauna (Bento *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2015; Ferreira; Pellegrini, 2019; Paixão, E.; Ferreira; Paixão, C., 2017; Pellegrini; Ferreira, 2016; Souza-Silva; Martins; Ferreira, 2011a; Souza-Silva; Iniesta; Ferreira, 2020). Additionally, plotting individuals, a method developed by Ferreira (2004) in his doctoral thesis, was more efficient when compared to other active search methods. However, this method has restrictions regarding the feasibility of identifying species in the field, and the quality of the result depends on the experience of the team that is performing it. Therefore, this method is obviously recommended for species that are easy to identify in the field and that do not depend on the visualization of taxonomic characters that can only be distinguished in the laboratory with the aid of magnification by stereomicroscope or microscope.

This method is particularly common in monitoring terrestrial fauna, as, in addition to recording species and their abundance, the occupation zones and movements of populations within caves can be observed. Studying a species of moth (Noctuidae, Hypena), Ferreira *et al.* (2015) observed that the areas of the cave occupied by individuals change under the influence of external factors related to seasonality (temperature and humidity) and dry and rainy periods. Similar results were observed for two species of cricket (*Endecous aguassay* and *Eidmanacris lencionii*) (Paixão, E.; Ferreira; Paixão, C., 2017). This same study describes the possibility of population fluctuations and movements being influenced by the competition that exists between these species.

Preliminary results from monitoring programs carried out in the Carajás region, coordinated by the authors of this chapter, also show occupancy patterns and population fluctuations for some species. These results are mainly influenced by seasonality and climate changes that occur annually (e.g. temperature, relative humidity, rainfall). For example, individuals of the

temperatura, umidade relativa do ar, pluviosidade). Por exemplo, para a espécie troglóbia *Charinus ferreus* Giupponi; Miranda, 2016, de maneira geral, os indivíduos se concentram sempre na mesma região da caverna, independentemente da época do ano (seca ou chuvosa), possivelmente ocupando locais onde as presas são mais abundantes e as condições ambientais mais estáveis (Figura 6). Espécies desse grupo taxonômico são predadoras noturnas e as condições ambientais nas regiões mais internas das cavernas (estabilidade ambiental e disponibilidade de presas) tornam este ambiente favorável para essas espécies (Miranda *et al*., 2021). Assim, comumente, são predadoras de topo da cadeia alimentar nos ambientes cavernícolas.

Outro exemplo são os resultados observados para os grilos *Phalangopsis ferratilis* Junta, Castro-Souza; Ferreira, 2020 e *Uvaroviella* sp. (espécie ainda não descrita para a ciência). Similarmente ao observado por Paixão e colaboradores (2017) para *E. aguassay* e *E. lencionii*, essas espécies ocupam regiões distintas das cavernas e a distribuição é influenciada pelo período do ano, sendo que *Uvaroviella* sp. é mais abundante no interior das cavernas durante o período de seca (Figura 7). Além disso, fica claro que não ocorre sobreposição significativa das áreas ocupadas, o que indica que as espécies exploram o ambiente de maneira distinta, provavelmente devido à competição interespecífica.

No longo prazo, a identificação desses padrões para diferentes espécies é importante nos programas de monitoramento, uma vez que os padrões podem ser modificados caso ocorram alterações no ambiente. Por exemplo, a distribuição de indivíduos pode ser fortemente influenciada pela temperatura e umidade dentro da caverna e, caso as condições mudem, a fauna pode ser afetada, como já relatado em outros estudos (Nicolosi *et al*., 2021; Souza-Silva *et al*., 2021). Assim, os estudos devem sempre buscar identificar as variáveis ambientais que influenciam os padrões populacionais e como as alterações no ambiente podem afetá-los. Os estudos que estão sendo conduzidos em cavernas ferríferas do Brasil têm buscado avaliar estas relações. Por exemplo, foi identificado que a abundância da espécie *Charinus ferreus* é negativamente influenciada pelo avanço da mineração, ou seja, as maiores populações são observadas em cavernas distantes da área de exploração (Trevelin *et al*., 2021). Sendo assim, estes estudos ajudam a definir quais as melhores estratégias para o desenvolvimento do empreendimento e para a gestão do patrimônio espeleológico.

troglobitic species *Charinus ferreus* Giupponi; Miranda, 2016, always concentrate in the same region of the cave, regardless of the time of year (dry or rainy), possibly occupying places where prey is more abundant and more stable environmental conditions (Figure 6). Species of Amblypygi are nocturnal predators and the environmental conditions in the innermost regions of the caves (environmental stability and prey availability) make this environment favorable for them (Miranda *et al*., 2021). Thus, they are commonly top predators of the food chain in cave environments.

Another example is the cricket species *Phalangopsis ferratilis* Junta, Castro-Souza; Ferreira, 2020 and *Uvaroviella* sp. (a species not yet described by science). Similar to what was observed by Paixão and (2017) for *E. aguassay* and *E. lencionii*, these species occupy different regions of caves, and their distribution is influenced by the period of the year, with *Uvaroviella* sp. being more abundant inside caves during the dry period (Figure 7). Furthermore, it is clear that there is no significant overlap in occupied areas, which indicates that species explore the environment differently, probably due to interspecific competition.

In the long term, identifying these patterns for different species is important for monitoring programs, since patterns can be modified if changes occur in the environment. For example, the distribution of individuals can be strongly influenced by temperature and humidity inside the cave and, if conditions change, the fauna can be affected, as already reported by other studies (Nicolosi *et al*., 2021; Souza-Silva *et al*., 2021). Therefore, studies should always seek to identify the environmental variables that influence population patterns and how changes in the environment can affect them. Studies being conducted in iron caves in Brazil have sought to evaluate these relationships. For example, it was found that the abundance of *Charinus ferreus* is negatively influenced by the advance of mining, that is, the greatest populations are observed in caves far from the exploration area (Trevelin *et al*., 2021). Therefore, these studies help to define the best strategies for the development of an enterprise and for the management of speleological heritage.

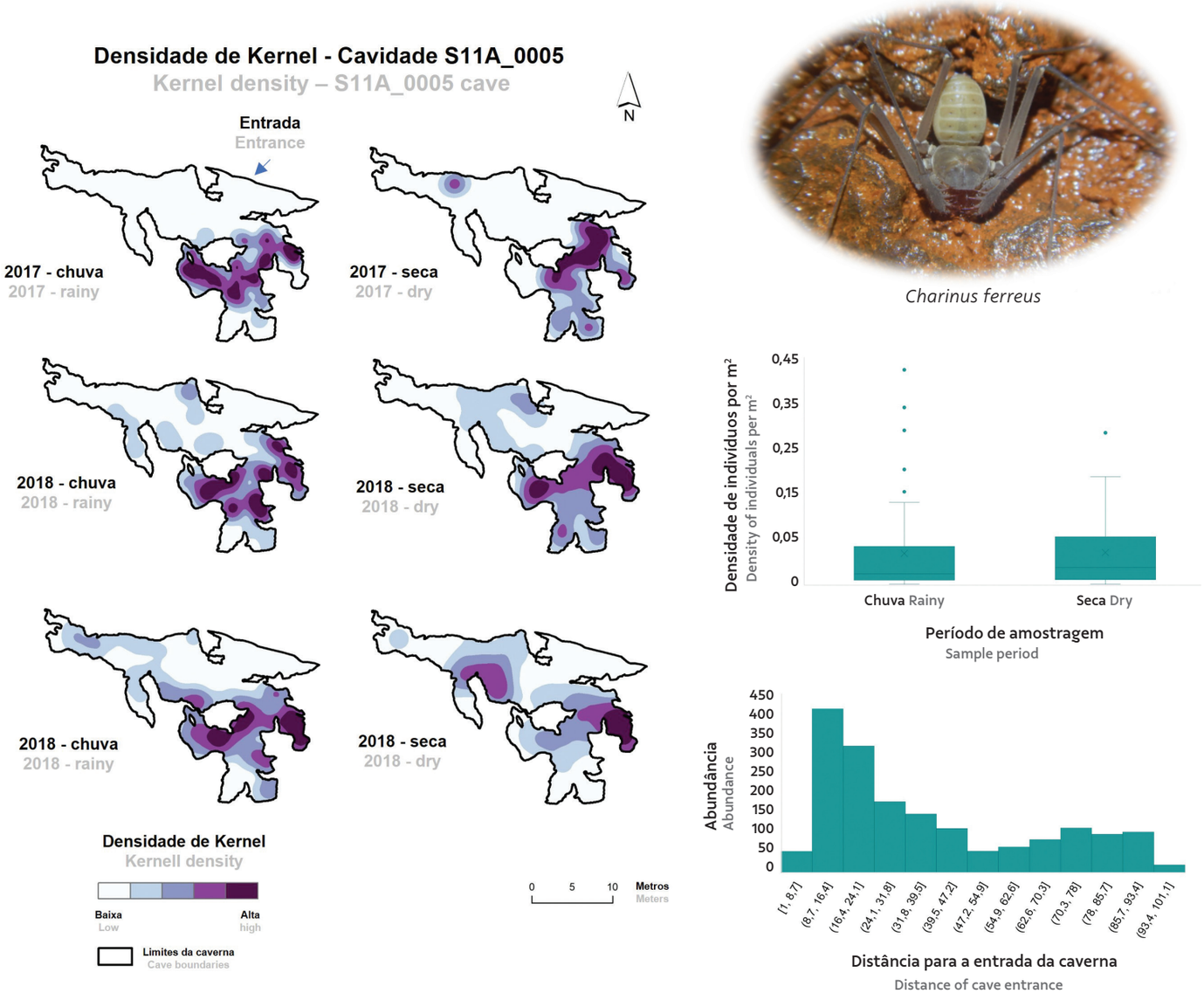


Figura 6: Esquerda: Aplicação do método de densidade de Kernel, a partir da plotagem de indivíduos, para a visualização do padrão de ocupação de indivíduos de *Charinus ferreus* em uma caverna ferrífera da região de Carajás, Pará, Brasil, onde é possível notar que as variações foram pouco significativas. Direita: Gráficos de abundância da espécie em dezenas de cavernas da mesma região, mostrando que, em geral, o parâmetro não muda significativamente entre os períodos de seca e chuva, mas que existe maior concentração em regiões intermediárias das cavernas, entre 10 e 30 metros de distância da entrada.

Figure 6: Left: Application of the Kernel density method, based on the plot of individuals, to visualize the occupancy pattern of individuals of *Charinus ferreus* in an ferriferous cave in the Carajás region, Pará, Brazil, where it is possible to notice that variation was of little significance. Right: Abundance graphs of the species in dozens of caves in the same region, showing that, in general, the parameter does not change significantly between dry and rainy periods, but that there is a greater concentration in intermediate regions of the caves, between 10 and 30 meters away from the entrance.

3.5 Métodos de marcação e recaptura

A captura-marcação-recaptura (CMR) constitui um método amplamente utilizado para a obtenção de informações que permitam realizar estimativas de densidade e da sobrevivência de populações animais, em especial para espécies que apresentam maior mobilidade, e, assim, pode ser amplamente utilizado em projetos de monitoramento da fauna cavernícola.

Para estudos ecológicos, os primeiros trabalhos de marcação e recaptura podem ser atribuídos a Carl Petersen, em 1889, que estudou peixes migratórios no Mar Báltico e, Frederick Lincoln, em 1930, que estimou a população de patos selvagens na América do Norte (Blower *et al.*, 1981). De forma geral, até o momento, a grande maioria destes estudos foram realizados com vertebrados. Entretanto, este método pode ser aplicado a qualquer grupo de organismos, podendo fornecer informações importantes sobre a história natural das espécies (Fernandez, 1995; Ricklefs, 2003; Southwood; Henderson, 2000), taxas de crescimento e de sobrevivência (Pradel, 1996), preferência de hábitat, área de vida, padrões de movimento e território de forrageamento, por exemplo (Cunjak *et al.*, 2005; Labonne; Gauldin, 2005; Mendes, 2006; Trajano, 1991, 1997, 2001a, 2001b).

No Brasil, poucos trabalhos de estimativa populacional foram realizados em cavernas, sendo eles, em sua grande maioria, realizados com opiliões (Gnaspini, 1996; Pinto-da-Rocha, 1996a, 1996b; Machado; Ferreira; Martins, 2003; Monte, 2017; Ramin, 2014; Santos, 1998; Willemart; Gnaspini, 2004; Zampaulo *et al.*, 2007), aranhas (Ferreira *et al.*, 2005; Guadanucci; Braga; Sá, 2015; Pellegatti-Franco, 2004), pseudoescorpiões (Andrade, 2004), grilos (Pellegatti-Franco, 1997), coleópteros (Bessi, 2005), amblipígios (Monte, 2017), anfíbios (Andrade; Costa; Eterovick, 2021), peixes (Trajano, 1991, 1997a, 2001) e morcegos (Arnone, 2008; Reis; Zampaulo; Talamoni, 2022; Trajano, 1984).

De forma geral, existem diversas possibilidades de técnicas de marcação que devem ser escolhidas de acordo com o objetivo e os recursos disponíveis para o estudo. Os principais métodos amplamente empregados para marcação dos indivíduos na natureza podem ser divididos em dois grupos: i) Identificação dos espécimes por meio de marcações naturais, como formas, padrões de coloração, padrões de manchas (anfíbios, baleias, onças, peixes, entre outras) ou cicatrizes adquiridas ao longo da vida (barbatanas de tubarões etc.) (Bradfield, 2004), ou marcações artificiais, como o uso de anilhas, colares, brincos, microchip, elastômero (morcegos, peixes, répteis, anfíbio, aves entre outros) ou com tinta atóxica, corretivos líquidos ou pigmentos

3.5 Marking and recapture methods

Capture-mark-recapture (CMR) is a widely used method for obtaining information that allows the density and survival of animal populations to be estimated. It is especially applicable to more mobile species and can therefore be widely used in cave fauna monitoring projects.

For ecological studies, early mark-recapture work can be attributed to Carl Petersen in 1889, who studied migratory fish in the Baltic Sea, and Frederick Lincoln, in 1930, who estimated the population of wild ducks in North America (Blower *et al*. al., 1981). Most of these studies carried out to date have involved vertebrates. Nonetheless, this method can be applied to any group of organisms and can provide important information about the natural history of species (Fernandez, 1995; Ricklefs, 2003; Southwood; Henderson, 2000), as well as growth and survival rates (Pradel, 1996), habitat preferences, home ranges, movement patterns and foraging territory, for example (Cunjak *et al.*, 2005; Labonne; Gauldin, 2005; Mendes, 2006; Trajano, 1991, 1997, 2001a, 2001b).

Few population estimation studies have been carried out in Brazilian caves, and the vast majority of those involved harvestmen (Gnaspini, 1996; Pinto-da-Rocha, 1996a, 1996b; Machado; Ferreira; Martins, 2003; Monte, 2017; Ramin, 2014; Santos, 1998; Willemart; Gnaspini, 2004; Zampaulo *et al.*, 2007), pseudoscorpions (Andrade, 2004), crickets (Pellegatti-Franco, 1997), coleopterans (Bessi, 2005), amblypygians (Monte, 2017), amphibians (Andrade; Costa; Eterovick, 2021), fish (Trajano, 1991, 1997a, 2001) and bats (Arnone, 2008; Reis; Zampaulo; Talamoni, 2022; Trajano, 1984).

There are several possibilities for marking techniques that must be chosen according to the objective and resources available for the study. The main methods for marking individuals in nature can be divided into two groups: i) identification of specimens through natural markings, such as shapes, color patterns, blotch patterns (amphibians, whales, jaguars, fish, among others) or scars acquired throughout life (shark fins, etc.) (Bradfield, 2004), or ii) the use of artificial markings, such as the use of rings, necklaces, earrings, microchips, elastomers (bats, fish, reptiles,

fluorescentes (invertebrados em geral) entre outros. Para estudos em que se opte pela utilização de tintas e/ou corretivo, é importante lembrar que cavernas, em geral, apresentam elevada umidade com tendência à saturação. Portanto, é fundamental que o material escolhido apresente secagem rápida e não comprometa a mobilidade ou sobrevivência dos indivíduos marcados. Sendo assim, é recomendável que sejam realizados testes de eficiência da marcação, em laboratório ou *in loco*, antes do início dos estudos. Da mesma forma, cuidados especiais devem ser tomados na utilização de colares, anilhas e brincos, evitando o acometimento de injúrias nos animais marcados, conforme observado por Pereira e colaboradores (2022).

Como premissas fundamentais para a realização destes estudos populacionais, é extremamente importante que (Amstrup *et al*., 2005; Begon, 1979; Cooch; White, 2001):

1) a marcação do indivíduo não interfira em sua taxa de sobrevivência, em seu sucesso reprodutivo ou no seu comportamento;
2) a marcação deve permanecer reconhecível durante todo o período do estudo;
3) os eventos de captura e recaptura devem estar separados por um período suficiente para que as marcas se misturem uniformemente na população;
4) Indivíduos marcados e não marcados devem ter a mesma chance de captura;
5) todas as amostras são instantâneas e cada liberação deve ser feita imediatamente após a amostragem.

A escolha do método de marcação deve ser pautada nas características de cada espécie, sempre prezando pelo método mais adequado e que implique no menor incômodo possível ao indivíduo marcado. A utilização de uma técnica de marcação inadequada ou a inobservância de questões específicas do animal (como marcação semipermanente em indivíduos jovens ou desatenção às características morfológicas de cada espécie) podem comprometer seu desenvolvimento (Pereira; Reis; Tavares, 2022).

Já em relação aos estimadores a serem utilizados, estes podem ser separados em dois grupos de acordo com as características ecológicas da espécie e do ambiente avaliado: 1) Populações fechadas: estimadores de populações fechadas são amplamente utilizados por serem menos restritivos e pressupõem ausência de migração, nascimento ou morte durante o período de

amphibians, birds, among others) or with non-toxic paint, liquid paper, or fluorescent pigments (invertebrates in general), among others. For studies in which the use of paints and/or liquid paper is chosen, it is important to remember that caves, in general, have high humidity with a tendency toward saturation. Thus, it is essential that the chosen material dries quickly and does not compromise the mobility or survival of the marked individuals. Therefore, it is recommended that marking efficiency tests be carried out, in the laboratory or *in loco*, before studies begin. Likewise, special care must be taken when using necklaces, rings and earrings, to avoid injuries to marked animals, as observed by Pereira *et al*. (2022).

As fundamental premises for carrying out these population studies, it is extremely important that (Amstrup *et al*., 2005; Begon, 1979; Cooch; White, 2001):

1) marking an individual does not interfere with its survival rate, reproductive success or behavior;
2) the mark remains recognizable throughout the study period;
3) capture and recapture events are separated by a sufficient period of time for tags to mix evenly in the population;
4) marked and unmarked individuals have the same chance of capture;
5) all samples are instantaneous and each release is made immediately after sampling.

The choice of marking method must be based on the characteristics of each species, always focusing on the most appropriate method that causes the least possible discomfort to the marked individual. The use of an inappropriate marking technique or non-compliance with issues specific to the animal (such as semi-permanent marking in young individuals or inattention to the morphological characteristics of each species) can compromise animal development (Pereira; Reis; Tavares, 2022).

Population estimators available for use can be separated into two groups according to the ecological characteristics of the species and the environment evaluated: 1) Closed populations: closed population estimators are widely used because they are less restrictive and assume the absence of migration, birth or death during the sampling period. In general, they are used in

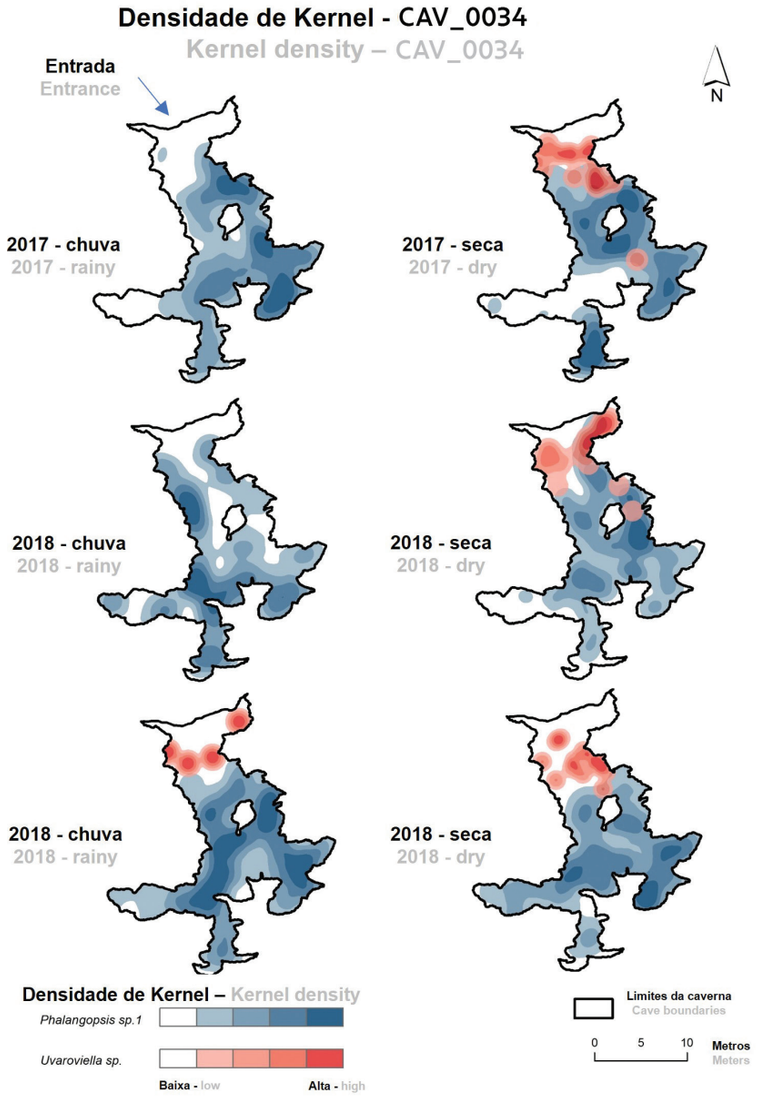


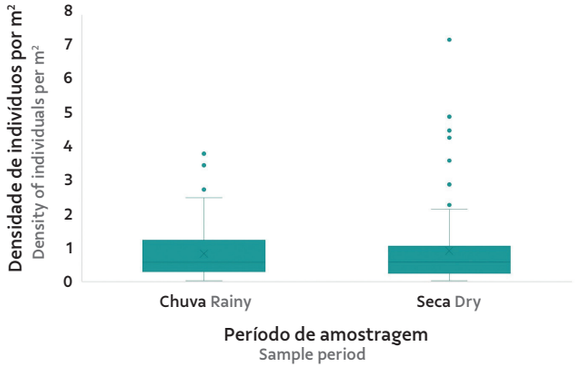
Figura 7: Aplicação do método de densidade de Kernell, a partir da plotagem de indivíduos, para visualização do padrão de ocupação de indivíduos de *Phalangopsis ferratilis* e *Uvaroviella* sp. em uma caverna ferrífera da região de Carajás, Pará, Brasil, onde é possível notar que os indivíduos das duas espécies ocupam regiões distintas. Gráficos de abundância das espécies em dezenas de cavernas da mesma região, mostrando que, em geral, o parâmetro não muda significativamente entre os períodos de seca e chuva para *Phalangopsis ferratilis* e que esta ocupa todas as regiões das cavernas, enquanto *Uvaroviella* sp. é mais abundante durante a seca e ocorre apenas próximo das entradas.

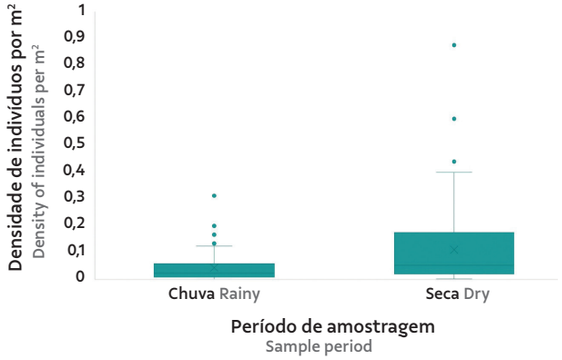


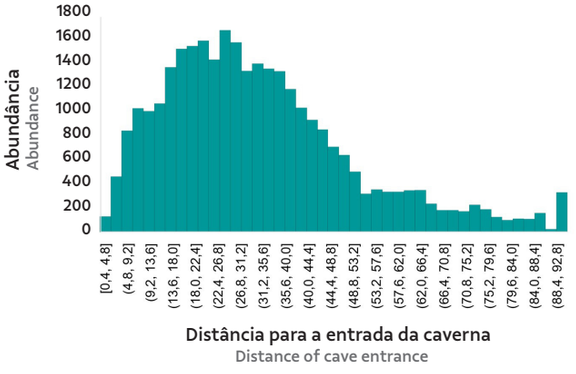
Phalangopsis ferratilis



Uvaroviella sp.







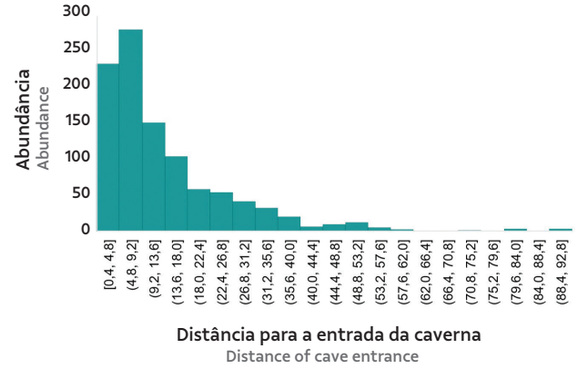


Figure 7: Application of the Kernel density method, based on the plot of individuals, to visualize the occupancy pattern of individuals of *Phalangopsis ferratilis* and *Uvaroviella* sp. in a ferriferous cave in the Carajás region, Pará, Brazil, where it is possible to notice that individuals of the two species occupy different regions. Graphs of species abundance in dozens of caves in the same region, showing that, in general, the parameter does not change significantly between dry and rainy periods for *Phalangopsis ferratilis* and that it occupies all regions of the caves, while *Uvaroviella* sp. it is more abundant during the dry season and only occurs near entrances.

amostragem. Em geral, são empregados em populações associadas a "ecossistemas fechados", em estudos que demandam um curto período de acompanhamento, onde são necessárias poucas ocasiões de amostragem (às vezes, apenas duas) e utilizam-se as proporções entre valores conhecidos e desconhecidos para estimar o tamanho populacional (Amstrup *et al.*, 2005; Lincoln, 1930; Otis *et al.*,1978; Petersen, 1896). Para este objetivo, Lincoln-Petersen é um estimador amplamente utilizado, mas que pode gerar resultados superestimados se o resultado das amostragens for pequeno (N inferior a 8) (Krebs, 1989); 2) Populações abertas: estimadores de populações abertas pressupõem ocorrência de migração, nascimento e morte durante o período de amostragem. Estudos com períodos maiores de amostragens frequentemente são feitos utilizando estimadores para populações abertas. O uso de estimadores para populações abertas, como o Jolly-Seber, é vantajoso, pois indicam, além do tamanho populacional, a probabilidade de sobrevivência (Cormack, 1989; Jolly, 1982; Laake; Rexstad, 2008; Laake; Rakhimberdiev; Turek, 2016; Seber, 1982). No entanto, há ainda modelos híbridos que permitem estimar parâmetros de acordo com pressupostos de modelo para população aberta, e estimar outros parâmetros com pressupostos de modelo para população fechada, aproveitando a robustez de cada estimador (Pollock, 1991).

De forma geral, tais métodos também podem ser aplicados em estudos de monitoramento biológico de espécies bioindicadoras em cavernas localizadas em áreas de influência de empreendimentos que possam causar danos ao patrimônio espeleológico. A utilização de espécies bioindicadoras tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta eficiente para compreender os efeitos de impactos antrópicos e, até mesmo, naturais sobre os ecossistemas (Mcgeoch, 1998). Este é um método já consolidado para ecossistemas epígeos (Gerlach; Samways; Pryke, 2013; Mcgeoch, 1998), mas que aos poucos tem começado a ser utilizado com sucesso em ecossistemas cavernícolas (Paoletti *et al.*, 2009; Trevelin *et al.*, 2019).

3.6 Periodicidade das amostragens

As cavernas no entorno de empreendimentos são alvo de monitoramentos de várias disciplinas após o processo de licenciamento ambiental, tais como, bioespeleologia, climatologia, sismografia, geomorfologia estrutural e hidrologia. No entanto, a sobreposição de monitoramentos em uma mesma caverna resulta em uma série de visitações em um curto intervalo de tempo, gerando perturbações no ecossistema que podem ser até mais intensas do que a própria atividade no entorno, pois

populations associated with "closed ecosystems", in studies that require a short period of monitoring with few sampling occasions (sometimes only two) and the proportions between known and unknown values are used to estimate the population size (Amstrup *et al.*, 2005; Lincoln, 1930; Otis *et al.*, 1978; Petersen, 1896). For this purpose, Lincoln-Petersen is a widely used estimator, but it can overestimate results if the sample size is small (N less than 8) (Krebs, 1989); 2) Open populations: open population estimators assume the occurrence of migration, birth and death during the sampling period. Studies with longer sampling periods are often carried out using estimators for open populations. The use of estimators for open populations, such as Jolly-Seber, is advantageous because they indicate, in addition to population size, the probability of survival (Cormack, 1989; Jolly, 1982; Laake; Rexstad, 2008; Laake; Rakhimberdiev; Turek, 2016; Seber, 1982). However, there are also hybrid models that allow estimating parameters according to model assumptions for an open population and estimating other parameters with model assumptions for a closed population, taking advantage of the robustness of each (Pollock, 1991).

In general, such methods can also be applied in biological monitoring studies of bioindicator species in caves located in areas influenced by projects that could cause damage to speleological heritage. The use of bioindicator species has been widely used as a tool efficient to understand the effects of anthropogenic and even natural impacts on ecosystems (Mcgeoch, 1998). This method is already consolidated for epigean ecosystems (Gerlach; Samways; Pryke, 2013; Mcgeoch, 1998), but has gradually begun to be used successfully in cave ecosystems (Paoletti *et al.*, 2009; Trevelin *et al.*, 2019).

3.6 Sampling frequency

Caves around projects are subject to monitoring by various disciplines after the environmental licensing process, such as biospeleology, climatology, seismography, structural geomorphology and hydrology. However, the overlapping of monitoring in the same cave results in a series of visits over a short period of time, generating disturbances in the ecosystem that can be even more intense than the activity in



Figura 8: Exemplos de marcação em vertebrados: A) Marcação artificial em morcego *Sturnira lilium* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1810) realizada com colar e anilha; B) Marcação artificial em morcego *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 realizada com anilhas de antebraço; C) Marcação artificial com elastômero colorido em indivíduo anestesiado de peixe do gênero *Trichomycterus;* D – F) Variação na coloração natural do dorso (marcação natural) de indivíduos de *Bokermannohyla martinsi* (Bokermann, 1964), como ferramenta na identificação de indivíduos por meio do uso de fotografias. Fotos: A – B, D – F: Robson de A. Zampaulo; C: Lívia M. Cordeiro.

Figure 8: Examples of marking with vertebrates: A) Artificial marking of a bat *Sturnira lilium* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1810) using collar and ring; B) Artificial marking of a bat *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 using forearm rings; C) Artificial marking with colored elastomer in an anesthetized fish of the genus *Trichomycterus*; D – F) Variation in the natural coloration of the dorrsum (natural marking) of individuals of *Bokermannohyla martinsi* (Bokermann, 1964), as a tool for identifying individuals through the use of photographs. Photos: A – B, D – F: Robson de A. Zampaulo; C: Lívia M. Cordeiro.

têm interferência direta nas cavernas e na fauna associada (pisoteamento do solo e substratos orgânicos, afugentamento de fauna, alterações microclimáticas). Deste modo, é importante analisar o que monitorar e como fazer para minimizar os efeitos adversos ao ecossistema cavernícola.

Os impactos provocados por visitas frequentes e intensas a cavernas são amplamente reconhecidos. A fauna é, habitualmente, o primeiro elemento a sofrer alterações quando estes ambientes são submetidos a pressões externas, o que resulta em mudanças nas suas condições naturais (Culver; Pipan, 2009). A visitação intensa pode promover mudanças na ecologia do ambiente ao ponto de ocasionar declínios

the surrounding area, as they have direct interference in the caves and with the associated fauna (trampling of soil and organic substrates, scaring fauna away, microclimatic changes). Therefore, it is important to analyze what to monitor and how to do it while minimizing adverse effects on the cave ecosystem.

The impacts of frequent and intense visits to caves are well-known. Fauna is usually the first element to undergo changes when these environments are subjected to external pressures, resulting in changes to their natural conditions (Culver; Pipan, 2009). Intense visitation can promote changes in the ecology of the environment to the point of causing population declines

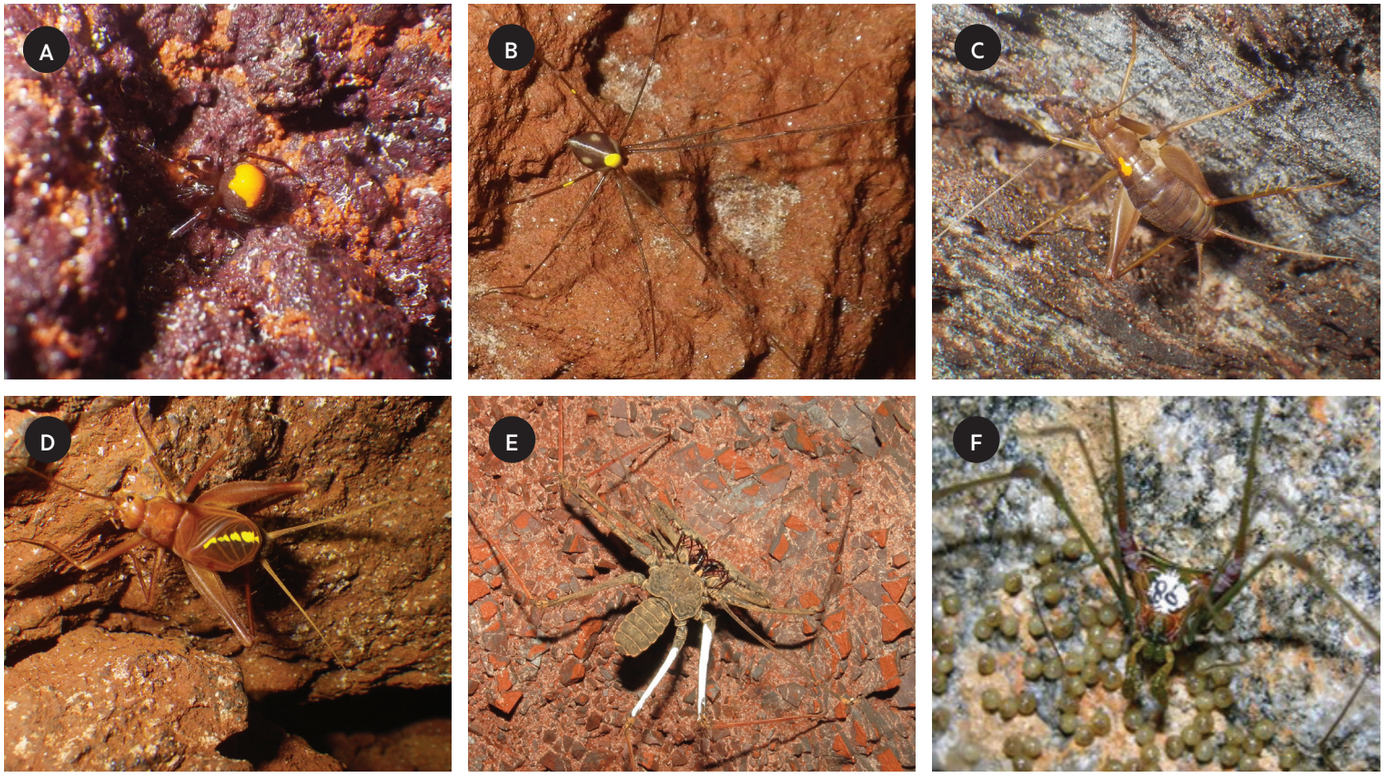


Figura 9: Exemplos de marcação em invertebrados: Marcação com tinta em: A) aranha do gênero *Plato*; B) aranha do gênero *Mesabolivar*; C–D) grilos do gênero *Endecous*, E) amblipígeo *Heterophrynus longicornis* (Butler, 1873); F) opilião *Serracutisoma gnaspinii* Da Silva, 2014. Fotos: A–D: Elmir L. Borges; E: Xavier Prous; F: Robson de A. Zampaulo.
Figure 9: Examples of marking with invertebrates: Marking with ink of: A) spider of the genus *Plato*; B) spider of the genus *Mesabolivar*; C–D) crickets of the genus *Endecous*, E) amblypygeous *Heterophrynus longicornis* (Butler, 1873); F) harvestman *Serracutisoma gnaspinii* Da Silva, 2014. Photos: A–D: Elmir L. Borges; E: Xavier Prous; F: Robson de A. Zampaulo.

populacionais ao longo do tempo, como observado para espécies de besouros (Coleoptera) em cavernas da Romênia (Moldovan; Racovitza; Rajka, 2003), ou até mesmo mudanças na estrutura da comunidade (Pacheco *et al*., 2021; Pellegrini; Ferreira, 2016).

Um dos fatores mais afetados é o microclima, registrando aumento de temperatura e da concentração de CO_2, e diminuindo a umidade relativa do ar, de acordo com o número de pessoas (Gillieson, 2011). Segundo o mesmo autor, em casos mais extremos, a temperatura pode aumentar de 1 a 2°C. Essas alterações têm influência direta nas populações, uma vez que o microclima da caverna influencia diretamente diversos parâmetros da fauna cavernícola, principalmente os relacionados ao padrão de ocupação das espécies (Mammola *et al*., 2015; Mammola; Isaia, 2018; Souza-Silva *et al*., 2021; Tobin; Hutchins; Schwartz, 2013).

Toda atividade humana dentro de uma caverna pode gerar

over time, as observed for species of beetles (Coleoptera) in caves in Romania (Moldovan; Racovitza; Rajka, 2003), or even changes in community structure (Pacheco *et al*., 2021; Pellegrini; Ferreira, 2016).

One of the most affected factors with visitation is the microclimate, with increasing temperature and CO_2 concentration, and decreasing relative air humidity, according to the number of people (Gillieson, 2011). According to the same author, in more extreme cases, the temperature can increase by 1 to 2°C. These changes have a direct influence on populations, since a cave's microclimate directly influences several parameters of cave fauna, mainly those related to the occupation patterns of species (Mammola *et al*., 2015; Mammola; Isaia, 2018; Souza-Silva *et al*., 2021; Tobin; Hutchins; Schwartz, 2013).

All human activity within a cave can have an impact, which

impacto, o que acaba tornando-se um dilema para o manejo, sendo necessário avaliar o ganho de realizar um estudo e os danos potenciais da pressão que isto pode ocasionar no ambiente (Gillieson, 2011). Portanto, deve-se buscar analisar qual frequência mínima de amostragem da fauna é necessária para obter os resultados necessários para responder se determinado empreendimento ou atividade está, ou não, promovendo alterações significativas no ambiente.

O primeiro estudo que analisou quantas coletas ao longo do ano seriam necessárias para obter os padrões populacionais em cavernas ferríferas foi realizado por Trevelin e colaboradores (2021). Neste estudo, utilizando um banco de dados com mais de 100 cavernas e mais de 30 espécies da região de Carajás, no estado do Pará, foi demonstrado que para a maioria das espécies os padrões populacionais podem ser identificados com apenas uma campanha anual, sendo estatisticamente similares àqueles obtidos com campanhas semestrais ou trimestrais.

O estudo citado acima demonstra que é possível minimizar os efeitos de amostragens recorrentes na fauna através de análises e delineamentos amostrais, baseados em dados históricos dos monitoramentos já realizados. No entanto, as características das cavernas e os padrões ecológicos são altamente variáveis e a definição da periodicidade mínima de amostragem deve sempre ser analisada caso a caso, considerando o objetivo do estudo e o tipo de empreendimento ou atividade em questão.

3.7 Monitoramento de substratos orgânicos

Como já mencionado, em cavernas ferríferas é pouco comum observar grandes acúmulos de recursos orgânicos nas regiões mais distantes das entradas. Isso porque a presença de riachos ou fluxos intermitentes com grande volume de água e grandes colônias de morcegos são menos frequentes do que em outras litologias. Assim, aqui serão apresentadas práticas de monitoramento, considerando os padrões mais comuns de aporte de nutrientes em cavernas ferríferas. Em condições específicas, de cavernas com grande quantidade de recursos orgânicos ou dinâmicas tróficas distintas, faz-se necessário avaliar outros métodos de monitoramento.

Os programas atuais de monitoramento utilizam o levantamento de todos os substratos orgânicos observados nas cavernas. Os mais comuns e passíveis de estabelecimento da fauna cavernícola são geralmente classificados em guano (principalmente de morcegos), material vegetal (esparsos ou acumulados, serrapilheira), raízes, detritos (vegetais e animais), fezes (vertebrados não voadores), carcaças e pelotas de

ends up becoming a management dilemma, making it necessary to evaluate the gain of carrying out a study and the potential damage from the pressure that this can cause in the environment (Gillieson, 2011). Therefore, one must seek to analyze the minimum sampling frequency of fauna necessary to obtain the results required for answer whether a given enterprise or activity is, or is not, promoting significant changes in the environment.

The first study to analyze how many collections would be necessary throughout the year to obtain population patterns in iron caves was that of Trevelin *et al.* (2021). Using a database with more than 100 caves and more than 30 species from the Carajás region, in the state of Pará, the authors demonstrated that, for most species, population patterns can be identified with just one annual campaign, being statistically similar to those obtained with semi-annual or quarterly campaigns.

The study cited above demonstrates that it is possible to minimize the effects of recurrent sampling on fauna through analyses and sampling designs, based on historical data from previous monitoring. However, cave characteristics and ecological patterns are highly variable, and defining the minimum sampling periodicity must always be analyzed on a case-by-case basis, considering the objective of the study and the type of enterprise or activity in question.

3.7 Monitoring organic substrates

As mentioned previously, it is uncommon to observe large accumulations of organic resources in regions furthest from the entrances of iron caves. This is because the presence of streams or intermittent flows with large volumes of water and large colonies of bats are less frequent than in other lithologies. Therefore, monitoring practices will be presented here considering the most common patterns of nutrient input in iron caves. In specific conditions, such as caves with a large amount of organic resources or different trophic dynamics, it is necessary to evaluate other monitoring methods.

Current monitoring programs survey all organic substrates observed in caves. The most common and important to the cave fauna are the guano (mainly from bats), plant material (sparse or accumulated, litter), roots, debris (vegetable and animal), feces

regurgitação de corujas.

As boas práticas atuais realizam a plotagem dos substratos orgânicos mais relevantes no mapa topográfico da caverna. Isso permite visualizar a distribuição de cada substrato e as possíveis variações ao longo do tempo. Neste método, a disposição dos recursos tróficos em cada caverna é avaliada qualitativamente de acordo com a idade aparente (recente, antigo) e abundância (pontual, manchas pequenas, manchas grandes).

Além da avaliação qualitativa, sugere-se buscar alternativas para avaliar quantitativamente os recursos orgânicos disponíveis para a fauna ao longo do tempo. No entanto, não são recomendados métodos que necessitem da remoção total de substratos para avaliar a quantidade disponível, uma vez que isso pode impactar negativamente a fauna, mesmo que temporariamente.

Para estimativas indiretas, uma possibilidade é o método de quadrantes, muitas vezes utilizado de forma qualitativa, mas que com alguns ajustes pode gerar estimativas aproximadas da quantidade de recursos disponível. A maioria desses estudos usam o método de quadrantes e a classificação e/ou quantificação dos substratos orgânicos para analisar a influência sobre a fauna (Pacheco *et al.*, 2021 Oliveira *et al.*, 2022; Souza-Silva *et al.*, 2021). No entanto, estes podem ser perfeitamente adaptados para o monitoramento ao longo do tempo. Pacheco *et al.* (2021), por exemplo, além da observação visual, utilizaram fotografias dos quadrantes em ângulo de 90° e um *software* específico para classificar e quantificar em relação à distribuição espacial dos substratos orgânicos, o que permitiria também uma comparação mais precisa ao longo do tempo.

Outra possibilidade é plotar da forma mais precisa possível a área ocupada pelo substrato no mapa da caverna. Assim, em ambiente GIS é possível definir a área (em m²), que poderá ser utilizada em análises e comparações temporais. Uma alternativa viável é a utilização de aplicativos para *smartphone* para mapeamento da posição e cálculo da área ocupada pelo substrato. Esta alternativa tem sido aplicada em monitoramento iniciado recentemente na região denominada como Serra Leste, no estado do Pará, e tem apresentado resultados bastante precisos (BioEspeleo, 2024).

Recomenda-se, sempre que possível, a associação dos diferentes métodos descritos aqui para que a classificação e quantificação dos recursos orgânicos seja a mais fidedigna possível. A Figura 11 apresenta um esquema hipotético dos possíveis métodos de monitoramento dos substratos orgânicos em cavernas ferríferas.

(non-flying vertebrates), carcasses and regurgitated owl pellets.

Current best practices plot the most relevant organic substrates on a topographic map of the cave. This allows the distribution of each substrate to be visualized, as well as possible variation over time. This method allows the arrangement of trophic resources in each cave to be qualitatively evaluated according to apparent age (recent, old) and abundance (spot, small patches, large patches).

In addition to qualitative assessment, alternatives should also be sought to quantitatively assess the organic resources available to fauna over time. However, methods that require the total removal of substrates to assess the amount available are not recommended, as this may negatively impact fauna, even if temporarily.

For indirect estimates, one possibility is the quadrant method. Although often used in a qualitative way, with some adjustments it can generate approximate estimates of the quantity of resources available. Most of these studies use the quadrant method and the classification and/or quantification of organic substrates to analyze the influence on fauna (Pacheco *et al.*, 2021 Oliveira *et al.*, 2022; Souza-Silva *et al.*, 2021). However, these can be perfectly adapted for monitoring over time. For example, in addition to visual observation, Pacheco *et al.* (2021) used photographs of quadrants at a 90° angle and a specific software to classify and quantify the spatial distribution of organic substrates, which would also allow a more accurate comparison over time.

Another possibility is to plot, as accurately as possible, the area occupied by a substrate on a cave map. Thus, in a GIS environment, it is possible to define the area (in m²) of substrates, which can be used in analyses and temporal comparisons. A viable alternative is the use of smartphone applications to map the position and calculate the area occupied by a substrate. This alternative has been applied in recently initiated monitoring in the region known as Serra Leste, in the state of Pará, and has presented very accurate results (BioEspeleo, 2024).

The use of a combination of the different methods described here is recommended, whenever possible, so that the classification and quantification of organic resources is as reliable as possible. Figure 11 presents a hypothetical scheme of possible methods for monitoring organic substrates in iron caves.





Figura 10: Esquema hipotético para análise qualitativa e quantitativa dos recursos orgânicos. No modelo hipotético é possível observar como poderiam ser delimitadas as áreas ocupadas pelos substratos e a delimitação de quadrantes para quantificação. As figuras A e B mostram a utilização de quadrantes para monitoramento dos substratos orgânicos. As figuras C a E mostram a utilização de aplicativo para smartphone para mapeamento da posição e cálculo da área ocupada pelo substrato. Fotos: A–B: Ativo Ambiental; C–E: BioEspeleo Consultoria Ambiental.

Figure 10: Hypothetical scheme for qualitative and quantitative analysis of organic resources. The hypothetical model shows how the areas occupied by substrates and the delimitation of quadrants for quantification could be established. Figures A and B show the use of quadrants for monitoring organic substrates. Figures C to E show the use of a smartphone application to map the position and calculate the area occupied by a substrate. Photos: A and B: Ativo Ambiental; C to E: BioEspeleo Consultoria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Monitoramentos bioespeleológicos de longo prazo em cavernas ferríferas ainda são escassos. Não existem registros de estudos que acompanharam sistematicamente populações por mais de cinco anos, sendo os trabalhos realizados na região da Serra dos Carajás um dos primeiros e mais amplos estudos com o objetivo de verificar a influência de atividades minerárias sobre comunidades cavernícolas disponíveis na literatura (Trevelin *et al.*, 2021). Por ser uma demanda recente, ainda não existem metodologias consagradas e padronizadas para a realização destes monitoramentos. Assim, todos os métodos propostos devem ser sempre passíveis de reavaliação para cada situação à medida que o conhecimento evolua.

Apesar da carência de estudos mais robustos, o histórico de quase uma década, desde o início dos primeiros monitoramentos, trouxe vários aprendizados. Podemos citar como os mais importantes: i) a proposta do método de busca ativa e plotagem de indivíduos (em especial para espécies alvo) como o mais adequado para esse tipo de programa, ii) a seleção de espécies indicadoras, quando as cavernas possuem populações estabelecidas com número significativo de indivíduos, iii) a realização de uma campanha anual como medida para diminuir os impactos da visitação frequente e coleta excessiva de indivíduos, e iv) a necessidade de avaliar caso a caso qual o melhor delineamento amostral.

Programas de monitoramento vinculados ao licenciamento ambiental, ou seja, onde o entorno das cavernas será alterado, precisam sempre ser planejados de forma integrada e não por temas isolados. Do ponto de vista da fauna, a influência de parâmetros que são obtidos em outros programas deve sempre ser testada e acompanhada, minimamente, ao longo da vida útil do empreendimento. Isso é importante, pois alguns parâmetros com influência significativa na fauna (como o microclima, por exemplo), caso sejam afetados pelo avanço das atividades, podem apresentar mudanças que são detectadas em um prazo mais curto do que os parâmetros biológicos, possibilitando a implementação de medidas para correção ou mitigação do impacto antes que a fauna seja afetada.

Por fim, atualmente os programas de monitoramento biológico focam primariamente em variáveis da caverna. No futuro, é recomendado que parâmetros do ambiente externo, principalmente relacionados à paisagem, também sejam monitorados e correlacionados com a fauna subterrânea ao longo

4 FINAL CONSIDERATIONS

Long-term biological monitoring in iron caves is still rare. There are no records of studies that systematically monitored populations for more than five years. In fact, the work carried out in the Serra dos Carajás region is one of the first and most extensive studies available in the literature aimed at determining the influence of mining activities on cave communities (Trevelin *et al.*, 2021). Because it is a recent demand, there are still no established and standardized methodologies for carrying out this monitoring. Therefore, all proposed methods must always be subject to reevaluation for each situation as knowledge evolves.

Despite the lack of more robust studies, the nearly a decade of history since the beginning of the first monitoring has taught several lessons, the most important being: i) the proposal of the method of active search and plotting of individuals (especially for target species) as the most suitable for this type of program; ii) the selection of indicator species, when caves have established populations with a significant number of individuals; iii) carrying out an annual campaign as a measure to reduce the impacts of frequent visitation and excessive collection of individuals; and iv) the need to evaluate the best sampling design on a case-by-case basis.

Monitoring programs linked to environmental licensing, that is, where the surroundings of the caves will be altered, always need to be planned in an integrated manner and not based on isolated themes. From a faunal point of view, the influence of parameters obtained in other programs must always be tested and monitored, at a minimum, throughout the useful life of the project. This is important, as if some parameters that can significantly influence fauna (such as microclimate) are affected by the progress of activities, they may present changes that are detected in shorter periods of time than biological parameters, making it possible to implement measures to correct or mitigate impacts before the fauna is affected.

Finally, biological monitoring programs currently focus primarily on cave variables. In the future, parameters of the external environment, mainly related to the landscape, must also be monitored and correlated with the subterranean fauna over time, as this would allow the adoption of control measures

do tempo, permitindo a adoção de medidas de controle para que as alterações no entorno não atinjam significativamente e irreversivelmente o ambiente cavernícola.

5 AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaríamos de agradecer a Vale S.A. e os colegas da Gerência de Espeleologia, por todo suporte durante a elaboração deste capítulo. As empresas de consultoria e consultores que ano após ano se esforçam para melhorar a qualidade dos programas de monitoramento da fauna associada às cavernas ferríferas. Por fim, agradecemos os técnicos dos órgãos ambientais licenciadores pela contribuição nas discussões para evolução e melhora nesses estudos.

to prevent changes in the surroundings from significantly and irreversibly affecting the cave environment.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, we would like to thank Vale S.A. and our colleagues in the Speleology Department for all support during the preparation of this chapter. We would also like to thank the consulting companies and consultants who, year after year, strive to improve the quality of the monitoring programs for the fauna associated with the ferriferous caves. Finally, we would like to thank the technicians from the environmental licensing agencies for their contribution to the discussions on the evolution and improvement of these studies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AMSTRUP, S. C. *et al*. Allocating harvests among polar bear stocks in the Beaufort Sea. **Arctic**, v. 58, n. 3, p. 247–259, 2005.

ANDRADE, M. C. M. de; COSTA, J. C. R.; ETEROVICK, P. C. Fidelity in the use of iron caves by *Bokermannohyla martinsi* (Anura: *Hylidae*): a step further in unveiling the importance of Brazilian caves for the herpetofauna. **Salamandra**, v. 57, n. 4, p. 502–512, 2021.

ANDRADE, R. de. **Estudo populacional do pseudoescorpião cavernícola *Maxchernes. iporangae* (Chernetidae, Pseudoscorpiones)**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARECHAVALETA, M.; SALA, L. L.; OROMI, P. La fauna invertebada de la Cueva de Felipe Reventón (Icod de los Vinos, Tenerife, Islas Canarias). **Vieraea**, v. 27, p. 229–244, 1999.

ARNONE, I. S. **Estudo da comunidade de morcegos no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – São Paulo**: uma comparação com 1980. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ATIVO AMBIENTAL LTDA. **Monitoramento biológico e climático do plano básico ambiental do projeto Ferro Carajás S11D**. Canaã dos Carajás: [*s. n.*], 2019. 258 p. Relatório Anual.

AULER, A. S. *et al*. Silica and iron mobilization, cave development and landscape evolution in iron formations in Brazil. **Geomorphology**, v. 398, 2022.

BARR, T. C. Cave ecology and the evolution of troglobites. **Evolutionary Biology**, v. 2, p. 35–102, 1968.

BEGON, M. **Investigating animal abundance**: capture recapture for biologists. London: Edward Arnold, 1979. 97 p.

BENTO, D. M. *et al*. Seasonal variations in cave invertebrate communities in the semiarid Caatinga, Brazil. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 78, n. 2, p. 61–71, 2016.

BIOESPELEO. 2024. **Plano de Gestão Espeleológica – Projeto Serra Leste 10 MTPA.** Curionópolis, Pará. 446 p.

BLOWER, J. G.; COOK, L. M.; BISHOP, J. A. **Estimating the size of animal populations**. London: George Allen & Unwin Ltd., 1981. 128p.

BRADFIELD, K. S. **Photographic identification of individual Archey's frogs, *Leiopelma archeyi*, from natural markings**. Wellington: Department of Conservation, 2004. 36 p. (DOC Science Internal Series, 191).

BRANDT MEIO AMBIENTE. **Plano básico ambiental do projeto Ferro Carajás S11D**: monitoramento biológico e climático. [Nova Lima]: [*s. n.*], 2021. 594 p. Relatório.

BRASIL. Decreto Federal nº 2.486, de 2 de fevereiro de 1998. Cria a Floresta Nacional de Carajás, no Estado do Pará, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 fev. 1998.

CALUX, A.; CASSIMIRO, R.; SALGADO, A. Caves in iron formations in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, southeastern Brazil: lithological, morphological and hydrological setting and speleogenesis. **Z. Geomorphol**., v. 62, n. 2, p. 125–144, 2019.

CARDOSO, P. *et al*. The seven impediments in invertebrate conservation and how to overcome them. **Biological Conservation**, v. 144, n. 11, p. 2647–2655, Nov. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.07.024.

COOCH, E. G.; WHITE, G. C. (eds.). A bit of background. *In*: COOCH, E. G.; WHITE, G. C. (eds.). **Program MARK**: a gentle introduction. 22nd edition. 2001. chap. 1. Disponível em: http://www.phidot.org/software/mark/docs/book/pdf/chap1.pdf. Acesso em: 11 maio 2023.

CORMACK, R. M. Log-linear models for capture-recapture. **Biometrics**, v. 45, n. 2, p. 395–413, 1989. DOI: 10.2307/2531485.

CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (orgs.). **Espeleologia e licenciamento ambiental**.

Brasília: ICMBio, 2019. 262p.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. **The biology of caves and other subterranean habitats**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2009.

CULVER, D. C.; SKET, B. Biological monitoring in caves. **Acta Carsologica**, v. 31, n. 1, p. 55–64, 2002.

CUNJAK, R. A. *et al*. Using stable isotope analysis with telemetry or mark–recapture data to identify fish movement and foraging. **Oecologia**, v. 144, p. 636–646, 2005.

DEHARVENG, L.; BEDOS, A. The cave fauna of Southeast Asia: origin, evolution and ecology. *In*: WILKENS, H.; CULVER, D. C.; HUMPHREYS, W. F. (eds.). **Ecosystems of the World**: 30 subterranean ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 2000.

DORNELAS, M. *et al*. Quantifying temporal change in biodiversity: challenges and opportunities. **Proceedings of the Royal Society Biological Sciences**, v. 280, n. 1750, p. 1–10, 2013.

ECOSSISTEMA CONSULTORIA AMBIENTAL. **Monitoramento Biológico e Climático nas cavidades conforme previsto no Plano Básico Ambiental do Projeto Ferro Carajás S11D**. [*S. l.*]: do autor, 2015. 692 p. Relatório.

FERNANDEZ, F. A. S. Métodos para estimativas de parâmetros populacionais por captura, marcação e recaptura. *In*: PERES–NETO, P. R.; VALENTIN, J. L.; FERNANDEZ, F. A. S. (eds.). **Tópicos em Tratamento de Dados Biológicos**. Rio de Janeiro: Instituto de Biologia/ UFRJ, 1995. v. 2.

FERREIRA, R. L. **A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos**. 2004. 158 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Manejo da Vida Silvestre) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste**, v. 3, p. 106–115, 2005.

FERREIRA, R. L. *et al*. Population dynamics of *Loxosceles similis* (Moenkhaus, 1898) in a brazilian dry cave: a new method for evaluation of population size. **Revista Brasileira de Zoociências**, v. 7, n.1, p. 129–141, jun. 2005.

FERREIRA, R. L. Biologia subterrânea: conceitos gerais e aplicação na interpretação e análise de estudos de impacto ambiental. *In*: CURSO DE ESPELEOLOGIA E LICENCIAMENTO AMBIENTAL [CECAV], IV, 2013. **Apostila** [...] Brasília: Instituto Terra Brasilis, 2013. p. 89–122.

FERREIRA, R. L. *et al*. Spatial and temporal fluctuations of the abundance of Neotropical cave–dwelling moth *Hypena* sp. (Noctuidae, Lepidoptera) influenced by temperature and humidity. **Subterranean Biology**, v. 16, p. 47–60, 2015.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; SOUZA–SILVA, M. Biodiversidade subterrânea em geosistemas ferruginosos. *In*: CARMO, F. F. do; KAMINO, L, H. Y. (orgs.). **Geossistemas ferruginosos do Brasil**: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Belo Horizonte: Instituto Prístino, 2015. p 195–231.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A. de; SOUZA–SILVA, M. Subterranean biodiversity in ferruginous landscapes. *In:* WHITE, W. B., CULVER, D. C. (eds.). **Cave Ecology**. Cambridge: Academic Press, 2018. p. 435–447. DOI: 10.1007/978–3–319–98852–8_21

FERREIRA, R. L. Guano communities. *In*: WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, T. **Encyclopedia of caves**. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2019a. p. 474–484.

FERREIRA, R. L. Biologia subterrânea: conceitos gerais e aplicação na interpretação e análise de estudos de impacto ambiental. *In*: CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (eds.). **Espeleologia e licenciamento ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019b. p. 128–166.

FERREIRA, R. L.; PELLEGRINI, T. G. Species–area model predicting diversity loss in an artificially flooded cave in Brazil. **International Journal of Speleology**, v. 48, n. 2, p. 155–165, 2019.

FONG, D. W. Food sources. *In*: WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, T. **Encyclopedia of caves**. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2019. p. 429–434.

GERLACH, J.; SAMWAYS, M.; PRYKE, J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. **Journal of Insect Conservation**, v. 17, p. 831–890, 2013.

GILLIESON, D. Management of Caves. *In*: VAN BEYNEN, P. (ed.). **Karst and Cave Management**. New York: Springer, 2011. p. 141–158.

GNASPINI, P. Population ecology of goniosoma spelaeum, a cavernicolous harvestman from south–eastern Brazil (arachnida: opiliones : gonyleptidae). **Journal of Zoology**, v. 239, p. 417–435, 1996.

GUADANUCCI, J. P. L.; BRAGA, P. M.; ; SÁ, F. de S. Aspects of the activity rhythm and population size of troglophilic mygalomorph spiders (*Trechona* sp., Dipluridae) in a quartzite cave in Minas Gerais, Brazil. **Journal of Natural History**, v. 49, p. 889–903, 2015.

HOLLAND, R. A. *et al*. The secret life of oilbirds: new insights into the movement ecology of a unique avian frugivore. **PLoS One**, v. 4, n. 12, p. 1–6, 2009.

HOWARTH, F. G. Ecology of cave arthropods. **Annual Review of Entomology**, v. 28, p. 365–389, 1983.

JAFFÉ, R. *et al*. Reconciling mining with the conservation of cave biodiversity: a quantitative baseline to help establish conservation priorities. **PLoS One**, v. 11, n. 12, p. 1–16, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0168348.

JAFFÉ, R. *et al*. Conserving relics from ancient underground worlds: assessing the influence of cave and landscape features on obligate iron cave dwellers from the Eastern Amazon. **PeerJ**, v. 6, p. 1–23, 2018. DOI: 10.7717/peerj.4531.

JASINSKA, E. J.; KNOTT, B.; MCCOMB, A. J. Root mats in ground water: a fauna–rich cave habitat. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 15, n. 4, p. 508–519, 1996.

JASINSKA, E. J.; KNOTT, B. Root–driven faunas in cave waters. *In*: WILKENS, W. F. H. H.; CULVER, D. C. (eds.). **Ecosystems of the World**: 30 subterranean ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 287–307.

JOLLY, G. M. Mark-recapture models with parameters constant in time. **Biometrics**, v. 38, n. 2, p. 301–321, 1982. DOI: 10.2307/2530445.

KREBS, C. S. **Ecology**: the experimental analysis of distribution and abundance. New York: Harper and Row, 1989. 688 p.

LAAKE, J.; REXSTAD, E. RMark: an alternative approach to building linear models in MARK. *In*: COOCH, E.; WHITE, G.C. (eds.): **Program MARK**: a gentle introduction. 2008. [p. 1–109]. [cap. 1. Appendix C].

LAAKE, J.; RAKHIMBERDIEV, B. A.; TUREK, D. **Package 'RMark'**. [*S. l.*: *s. n.*], 2016.

LABONNE, J.; GAUDIN, P. Exploring population dynamics patterns in a rare fish, Zingel asper, through capture-mark-recapture methods. **Conservation Biology**, v. 19, n. 2, p. 463–472, 2005.

LADLE, R. J. *et al*. Unexplored diversity and conservation potential of neotropical hot caves. **Conservation Biology**, v. 26, n. 6, p. 978–982, 2012. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2012.01936.x.

LINCOLN, F. C. **Calculating waterfowl abundance on the basis of banding returns**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1930. p. 1-8. (Circular, 118).

LUND, P. W. Primeira memória sobre a fauna das cavernas: introdução. In: LUND, P. W.; COUTO, P. C. 1950. Memórias sobre a Paleontologia Brasileira. Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro, 1950. p. 107–130.

MACHADO, S. F.; FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Aspects of population ecology of *Goniossoma* sp. (Arachnida Opiliones Gonyleptidae) in limestone caves in southeastern Brazil. **Tropical Zoology**, v. 16, p. 13–31, 2003.

MAMMOLA, S. *et al*. Seasonal dynamics and micro-climatic preference of two Alpine endemic hypogean beetles. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 3, p. 239–249, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.3.

MAMMOLA, S.; ISAIA, M. Day–night and period al variations of a subterranean invertebrate community in the twilight zone. **Subterranean Biology**, v. 27, p. 31–51, 2018. DOI: 10.3897/subtbiol.27.28909.

MANENTI, R.; LUNGHI, E.; FICETOLA, G. F. The distribution of cave twilight-zone spiders depends on microclimatic features and trophic supply. **Invertebrate Biology**, v. 134, n. 3, p. 242–251, 2015. DOI: 10.1111/ivb.12092.

MCGEOCH, M. A. The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. **Biological Reviews**, v. 73, n. 2, p. 181–201, 1998. DOI: 10.1017/S000632319700515X.

MCGEOCH, M. A. *et al*. Conservation and monitoring of invertebrates in terrestrial protected areas. **Koedoe**, v. 53, n. 2, p. 1-13, 2011.

MENDES, L. F. História natural dos amborés e peixes-macaco (Actinopterygii, Blennioidei, Gobioidei) do Parque Nacional Marinho do Arquipélago de Fernando de Noronha, sob um enfoque comportamental. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 23, n. 3, p. 817–823, 2006.

MIRANDA, G. S. de *et al*. Systematic revision of the pantropical whip spider family Charinidae Quintero, 1986 (Arachnida, Amblypygi). **European Journal of Taxonomy**, v. 772, p. 1–409, 2021. DOI: 10.5852/ejt.2021.772.1505.

MOLDOVAN, O. T.; RACOVITZA, G.; RAJKA, G. The impact of tourism in Romania show caves: the example of the beetle populations in the Ursilor Cave of Chiscau (Transilvania, Romania). **Subterranean Biology**, v. 1, p. 73–78, 2003.

MONTE, B. G. O. do. **Ecologia populacional do amblipígeo Charinus eleonorae Baptista & Giupponi 2003 (Arachnida: Amblypygi: Charinidae) e dos opiliões Iandumoema uai Pinto-da-Rocha 1996, Eusarcus cavernicola Hara & Pinto-da-Rocha 2010 e Eusarcus aduncus MelloLeitão 1942 (Arachnida: Opiliones: Gonyleptidae) da Gruta Olhos d' Água, Itacarambi, Minas Gerais**. 2017. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

NICOLOSI, G. *et al*. Microhabitat selection of a Sicilian subterranean woodlouse and its implications for cave management. **International Journal of Speleology**, v. 50, n.1, p. 53–63, 2021.

OLIVEIRA, I. P. M. R. de *et al*. Rising water flow as a factor of organic material importation into caves. **Acta Carsologica**, v. 47, n. 2–3, p. 169–183, 2018.

OLIVEIRA, L. F. *et al*. Recreational caving impacts of visitors in a high-altitude cave in Bolivian Andes: main effects on microhabitat structure and faunal distribution. **International Journal of Speleology**, v. 51, n. 2, p. 93–103, 2022.

OLIVEIRA, M. P. A. de. **Os métodos de coleta utilizados em cavernas são eficientes para amostragem da fauna subterrânea?** 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2015.

OTIS, D. L. *et al*. Statistical inference from capture data on closed animal populations. **Wildlife Monographs**, n. 62, p. 3-135, 1978.

PACHECO, G. S. M. *et al*. Tourism effects on the subterranean fauna in a Central American cave. **Insect Conservation and Diversity**, v. 14, n. 3, [p. 294–306], nesp., May. 2021. DOI: 10.1111/icad.12451.

PAIXÃO, E. M.; FERREIRA, R. L.; PAIXÃO, C. A. Spatial distribution and seasonal behavior of Endecous aguassay and Eidmanacris lencionii (Orthoptera: Grylloidea: Phalangopsidae) in an artificial iron ore cave. **Speleobiology Notes**, v. 9, p. 23–33, 2017.

PAOLETTI, M. G. *et al*. Cave dwelling invertebrates: possible indicators of cave pollution – an Italian case. **Contributions to Natural History**, v. 12, p. 1029–1047, 2009.

PASCOALOTO, R. B. **Dinâmica populacional do carabídeo cavernícola *Schizogenius ocellatus* Whithead, 1972 (Coleoptera) e sua recuperação após eventos de enchentes (sudeste do Estado de São Paulo, Brasil)**. 2005. 204 f. Tese (Doutorado em Zoologia) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PELLEGATTI-FRANCO, F. **Estudo da história natural do grilo cavernícola Strinatia brevipennis (Ensifera: Phalangopsidae) em laboratório**. Orientador: Pedro Gnaspini. 1997. 66 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São

Paulo, 1997.

PELLEGATTI-FRANCO, F. **Biologia e ecologia populacional de *Ctenus fasciatus* Mello-Leitão e Enoploctenus cyclothorax (Bertkau) em cavernas do Alto Ribeira, Iporanga, SP (Araneae: Ctenidae)**. Orientadora: Eleonora Tajano. 2004. 136 f. Tese (Doutorado em Zoologia) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PELLEGRINI, T. G.; FERREIRA, R. L. Structure and interactions in a cave guano-soil continuum community. **European Journal of Soil Biology**, v. 57, p. 19–26, Jul./Aug. 2013. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2013.03.003.

PELLEGRINI, T. G.; FERREIRA, R. L. Are inner cave communities more stable than entrance communities in Lapa Nova show cave? **Subterranean Biology**, v. 20, p. 15–37, Nov. 2016. DOI: 10.3897/subtbiol.20.9334.

PEREIRA, M. S. R.; REIS, A. S.; TAVARES, V. da C. Morcegos. *In*: ZAMPAULO, R. A.; PROUS, X. (eds.). **Fauna cavernícola do Brasil**. Belo Horizonte: Rupestre, 2022. p. 546–569.

PETERSEN, C. G. J. The yearly immigration of young plaice into Limfjord from the German sea. **Report of the Danish Biological Station**, v. 6, p. 1–48, 1896.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S.; MARTINS, F. Carajás national forest: iron ore plateaus and caves in Southeastern Amazon. *In*: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. dos (eds.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, 2015. p. 273–283. DOI: 10.1007/978-94-017-8023-0_25.

PINTO-DA-ROCHA, R. Description of the male of Daguerreia inermis Soares & Soares, with biological notes on population size in the gruta da Lancinha, Paraná, Brazil (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae). **Revista Brasileira de Zoologia**. v. 13, n. 4, p. 833–842, 1996a. DOI: 10.1590/S0101-81751996000400004.

PINTO-DA-ROCHA, R. Biological notes on and population size of *Pachylospeleus strinatii* Silhavy, 1974 in the gruta das Areias de Cima, Iporanga, south-eastern Brazil (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae). **Bulletin of the British Arachnological Society**, v. 10, p. 189–192, Jan. 1996b.

PIPAN, T.; CULVER, D. C. Epikarst communities: biodiversity hotspots and potential water tracers. **Environmental Geology**, v. 53, p. 265–269, Oct. 2007. DOI: 10.1007/s00254-007-0640-y.

POLLOCK, K. H. Modeling capture, recapture, and removal statistics for estimation of demographic parameters for fish and wildlife populations: past, present, and future. **Journal of the American Statistical Association**, v. 86, n. 413, p. 225–238. Mar. 1991. DOI: 10.2307/2289733.

POULSON, T. L. The Mammoth cave ecosystem. *In*: CAMACHO, A. I. (ed.). **The natural history of biospeleology**. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales, 1992. p. 569–611.

PRADEL, R. Utilization of capture-mark-recapture for the study of recruitment and population growth rate. **Biometrics**, v. 52, p. 703–709, Jun. 1996.

PRICE, J. J.; JOHNSON, K. P.; CLAYTON, D. H. The evolution of echolocation in swiftlets. **Journal of Avian Biology**, v. 35, n. 2, p. 135–143, Mar. 2004. DOI: 10.1111/j.0908-8857.2004.03182.x.

RAMIN, A. Z. **Deslocamento ao longo da noite e outros aspectos da biologia do opilião Serracutisoma pseudovarium no Parque Estadual Intervales, São Paulo, Brasil**. Orientador: Pedro Gnaspini Netto. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

REIS, A. S.; ZAMPAULO, R. A.; TALAMONI, S. A. Aspectos ecológicos de duas grandes colônias de morcegos nectarívoros (*Anoura geoffroyi* gray, 1838) residentes em cavernas no Brasil: implicações para conservação. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 1, n. 11, p. 40–64, out. 2022. DOI: 10.37002/rbesp.v1i11.2316.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003. 501 p.

SANTOS, F. H. S. dos. **Estudo da atividade locomotora do opilião cavernícola *Goniosoma spelaeum* (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae)**. Orientador: Pedro Gnaspini Netto.1998. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

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. DOI: 10.1890/10-0157.1.

SEBER, G. A. F. **The estimation of animal abundance**: and related parameters. 2nd ed. New York: Macmillan, 1982. 654 p.

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, Nov. 2015. DOI: 10.3897/subtbiol.16.5470.

SIMÕES, M. H.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Species-area relationship and richness persistence as a proxy of environmental carrying capacity: a case study in a neotropical show cave. **Acta Oecologica**, v.116, 2022. DOI: 10.1016/j.actao.2022.103848.

SIMON, K. S.; BENFIELD, E. F.; MACKO, S. A. Food web structure and the role of epilithic films in cave streams. **Ecology**, v. 84, n. 9, p. 2395–2406, Sept. 2003. DOI: 10.1890/02-334.

SIMON, K. S.; PIPAN, T.; CULVER, D. C. A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 69, n. 2, p. 1–6, 2007.

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. DOI: 10.1080/00222930801995762.

SOUTHWOOD, T. R. E.; HENDERSON, P. A. **Ecological Methods**. 3rd. ed Malden: Blackwell, 2000. 575 p.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Trophic dynamics in a Neotropical limestone cave. **Subterranean Biology**, v. 9, p. 127–138, 2011b. DOI: 10.3897/subtbiol.9.2515.

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 Conservation**, v. 20, n. 8, p. 1713–729, 2011a. DOI: 10.1007/s10531–011–0057–5.

SOUZA–SILVA, M.; INIESTA, L. F. M.; FERREIRA, R. L. Invertebrates diversity in mountain Neotropical quartzite caves: which factors can influence the composition, richness, and distribution of the cave communities? **Subterranean Biology**, v. 33, p. 23–43, Feb. 2020. DOI: 10.3897/subtbiol.33.46444.

SOUZA–SILVA, M. *et al*. Habitat selection of cave–restricted fauna in a new hotspot of subterranean biodiversity in Neotropics. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, p. 4223–4250, Dec. 2021. DOI: 10.1007/s10531–021–02302–8.

SOUZA–SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Dinâmica Trófica em Ambientes de Cavernas. *In*: ZAMPAULO, R. A.; PROUS, X. (eds.). **Fauna cavernícola do Brasil**. Belo Horizonte: Rupestre, 2022. p. 59–81.

SOUZA–SILVA, M.; SÁLVIO JUNIOR, A.; FERREIRA, R. L. Food resource availability in a quartzite cave in the Brazilian montane Atlantic Forest. **Journal of Cave and Karst Studies,** [s.l.], v. 75, n. 3, p. 177–188, 2013. DOI 10.4311/2010JCKS0158.

SPELAYON CONSULTORIA. **Monitoramento espeleológico da mina de Brucutu**. Belo Horizonte: Spelayon Consultoria, 2022. 217 p. Relatório Anual.

SPELLERBERG, I. F. **Monitoring ecological change**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: 10.1017/CBO9780511614699.

SUZUKI, F. M.; ZAMBALDI, L. P.; POMPEU, P. dos S. Uso de marcação e recapture para estimar a abundância e densidade de *Trichomycterus brasiliensis* (Siluriformes, Trichomycteridae) em porções do córrego da Bexiga, Carrancas, Minas Gerais, Brasil. **Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão**, v. 28, p. 89–104, dez. 2010.

TAYLOR, S. J.; KREJCA, J. K.; DENIGHT, M. L. Foraging range and habitat use of *Ceuthophilus secretus* (Orthoptera: Rhaphidophoridae), a key trogloxene in central Texas cave communities. **The American Midland Naturalist**, v. 154, n.1, p. 97–114, Jul. 2005.

TOBIN, B. W.; HUTCHINS, B. T.; SCHWARTZ, B. F. Spatial and temporal changes in invertebrate assemblage structure from the entrance to deep–cave zone of a temperate marble cave. **International Journal of Speleology**, v. 42, n. 3, p. 203–214, 2013. DOI: 10.5038/1827–806X.42.3.4.

TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, São Paulo, v. 2, n. 5, p. 255–320, dez. 1984. DOI: 10.1590/S0101–81751984000100001.

TRAJANO, E. Populational ecology of *Pimelodella kronei*, troglobitic catfish from southeastern Brazil (Siluriformes, Pimelodidae). **Environmental Biology of Fishes**, v. 30, p. 407–421, Apr. 1991. DOI: 10.1007/BF02027984.

TRAJANO, E. Population ecology of *Trichomycterus itacarambiensis*, a cave catfish from eastern Brazil (Siluriformes, Trichomycteridae). **Environmental Biology of Fishes**, v. 50, p. 357–369, Dec. 1997. DOI: 10.1023/A:1007366119261.

TRAJANO, E. Ecology of subterranean fishes: an overview. **Environmental Biology of Fishes**, v. 62, p. 133–160, Oct. 2001a. DOI: 10.1023/A:1011841913569.

TRAJANO, E. Habitat and population data of troglobitic armored cave catfish, *Ancistrus cryptophthalmus* Reis, 1987, from central Brazil (Siluriformes: Loricariidae). **Environmental Biology of Fishes**, v. 62, p. 195–200, Oct. 2001b. DOI: 10.1023/A:1011884829498.

TRAJANO, E. Variações anuais e infra–anuais em ecossistemas subterrâneos: implicações para estudos ambientais e preservação de cavernas. **Revista da Biologia**, v. 10, n. 2, p. 1–7, jul. 2013. DOI: 10.7594/revbio.10.02.01.

TREVELIN, L. C. *et al*. Biodiversity surrogates in Amazonian iron cave ecossystems. **Ecological Indicators**, v. 101, p. 813–820, Jun. 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.086.

TREVELIN, L. C. *et al*. Optimizing speleological monitoring efforts: insights from long–term data for tropical iron caves. **PeerJ,** v. 16, n. 9, Apr. 2021. DOI: 10.7717/peerj.11271.

VENARSKY, M. P.; BENSTEAD, J. P.; HURYN, A. D. Effects of organic matter and season on leaf litter colonization and breakdown in cave stream. **Freshwater Biology**, v. 57, n. 4, p. 773–786, Feb. 2012. DOI: 10.1111/j.1365–2427.2012.02742.x.

WEINSTEIN, P.; SLANEY, D. Invertebrate faunal survey of Rope Ladder Cave, northern Queensland: a comparative study of sampling methods. **Journal of the Australian Entomological Society**, v. 34, n. 3, p. 233–236, 1995.

WILLEMART, R. H.; GNASPINI, P. Spatial distribution, mobility, gregariousness, and defensive behavior in the Brazilian cave harvestman *Goniosoma albiscriptum* (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae). **Animal Biology**, v. 54, n. 3, p. 221–235, 2004. DOI: 10.1163/1570756042484674.

WYNNE J. J. *et al*. Capturing arthropod diversity in complex cave systems. **Diversity and Distributions**, v. 24, n. 10, p. 1478–1491, July 2018. DOI: 10.1111/ddi.12772.

WYNNE J. J. *et al*. Fifty years of cave arthropod sampling: techniques and best practices. **International Journal of Speleology**, v. 48, n.1, p. 33–48, Jan. 2019. DOI: 10.5038/1827–806X.48.1.2231.

ZAMPAULO, R. de A. *et al*. Ecologia populacional de duas espécies de opiliões (Arachnida, Opiliones) em grutas graníticas na Serra do Mar (Bertioga–SP). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29., 2007, Ouro Preto. **Resumos** [...] Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2007. p. 325–334.

ZAMPAULO, R. A.; SIMÕES, M. H. História e evolução do conhecimento sobre a fauna cavernícola do Brasil. *In*: ZAMPAULO, R. A.; PROUS, X. (eds.). **Fauna cavernícola do Brasil**. Belo Horizonte: Rupestre, 2022. p. 23–58.

ZEPON, T.; BICHUETTE, M. E. Influence of substrate on the richness and composition of Neotropical cave fauna. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 89, n. 3, p. 1615–1628, jul./ set. 2017. DOI: 10.1590/0001–3765201720160452.



4

Trachops cirrhosus (Spix, 1823)
Foto/Photo: Matheus H. Simões

Monitoramento de morcegos em cavidades ferríferas

DANIELLE PEDROSA OLIVEIRA
SEBASTIÃO MAXIMIANO CORRÊA GENELHÚ
GIULLIANA APPEL
THAYSE CRISTINE MELO BENATHAR
LEONARDO CARREIRA TREVELIN
MARIANE SOARES RIBEIRO PEREIRA

1 INTRODUÇÃO

Os morcegos se destacam por utilizarem de maneira eficiente as cavernas como abrigo (Kunz, 1982). No Brasil, cerca de 45% das espécies conhecidas já foram registradas em cavernas, sendo esse uso de forma permanente ou temporária (Pereira *et al.*, 2022), uma vez que esses ambientes oferecem maior estabilidade climática em relação ao meio externo, e proteção contra o clima adverso e predadores (Arita, 1996; Kunz, 1982; Tejedor *et al.*, 2004; Trajano, 1995). Por sua vez, a quantidade e a distribuição das cavernas, sua morfologia e diversidade, bem como o contexto da paisagem externa, incluindo sua vegetação, são fatores preponderantes para essa seleção (Arita, 1996; Kunz, 1982; Trajano, 1985), sendo que, a escolha de cavernas como abrigos é, provavelmente, mediada por características intrínsecas das espécies ou mesmo por relações interespecíficas (Avila- Flores; Medellín, 2004; Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2020; Rodrígues-Duran; Soto-ceteno, 2003; Talamoni *et al.*, 2013; Vargas-Mena *et al.*, 2020).

As cavernas são ambientes fundamentais para o ciclo de vida de algumas espécies de morcegos, oferecendo abrigo e locais para reprodução (Barros *et al.*, 2020). Por outro lado, esses animais também desempenham papéis ecológicos cruciais nesses ecossistemas (Furey; Racey, 2016). Categorizados como espécies troglóxenas – organismos encontrados frequentemente no ambiente subterrâneo, mas que saem periodicamente para a superfície para completar seu ciclo de vida –, exercem um importante papel em cavidades naturais subterrâneas, uma vez que introduzem matéria orgânica nesses ambientes, tais como guano, restos de animais e vegetais dos quais se alimentam, além de suas próprias carcaças quando morrem no interior destes ambientes (Ferreira; Martins, 1999; Ferreira; Prous; Martins, 2007). Em muitas cavernas, o guano constitui o principal recurso energético, sendo, portanto, uma das bases da cadeia alimentar e da manutenção da biodiversidade dos ecossistemas cavernícolas, especialmente em cavernas permanentemente secas (Ferreira *et al.*, 2007; Trajano; Gnaspini-Netto, 1991).

Monitoring bats in ferriferous caves

DANIELLE PEDROSA OLIVEIRA
SEBASTIÃO MAXIMIANO CORRÊA GENELHÚ
GIULLIANA APPEL
THAYSE CRISTINE MELO BENATHAR
LEONARDO CARREIRA TREVELIN
MARIANE SOARES RIBEIRO PEREIRA

1 INTRODUCTION

Bats are remarkable for their efficient use of caves as shelter (Kunz, 1982). Approximately 45% of known Brazilian species have been recorded in caves, whether permanently or temporarily (Pereira *et al.*, 2022), since these environments offer greater climatic stability than the external environment and protection against adverse weather and predators (Arita, 1996; Kunz, 1982; Tejedor *et al.*, 2004; Trajano, 1995). In turn, the quantity and distribution of caves and their morphology and diversity, as well as the context of the external landscape, including its vegetation, are preponderant factors for the selection of caves as shelters (Arita, 1996; Kunz, 1982; Trajano, 1985) – a choice that is probably mediated by intrinsic traits of the species or even interspecific relationships (Avila- Flores; Medellín, 2004; Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2020; Rodrígues-Duran; Soto-ceteno, 2003; Talamoni *et al.*, 2013; Vargas-Mena *et al.*, 2020).

Caves are fundamental environments for the life cycle of some bat species, offering shelter and breeding sites (Barros *et al.*, 2020). On the other hand, these animals also play crucial ecological roles in these ecosystems (Furey; Racey, 2016). Categorized as trogloxenic – organisms frequently found in the underground environment, but which periodically come to the surface to complete their life cycle – bats play an important role in caves, since they introduce organic matter into these environments, such as guano and animal and plant remains from their feeding, as well as their own carcasses (Ferreira; Martins, 1999; Ferreira; Prous; Martins, 2007). Guano constitutes the main energy resource in many caves and is therefore one of the bases of the food web and the maintenance of biodiversity in cave ecosystems, especially in permanently dry caves (Ferreira *et al.*, 2007; Trajano; Gnaspini-Netto, 1991).

Há evidências de que algumas espécies de morcegos possuem forte associação com cavernas, sendo essas associações obrigatórias ou oportunísticas (Kunz, 1982), existe ainda na literatura várias formas de classificação quanto a essa relação (Arita, 1993; Guimarães; Ferreira, 2014; Voss *et al*., 2016). No Brasil, a classificação mais utilizada é de Guimarães e Ferreira (2014), que analisaram dados disponíveis na literatura de 58 espécies que utilizam cavernas como abrigo, classificando-as como "essencialmente cavernícolas" (espécies que se abrigam majoritariamente em cavernas), "cavernícolas oportunistas" (que usam cavernas de forma oportuna, mas rotineiramente utilizam outro tipo de abrigo) e "não cavernícolas". Barros e Bernard (2023) atualiza para 81 espécies de morcegos registradas em cavernas e, entre as quatro espécies ameaçadas de extinção, pelo menos três são consideradas como essencialmente cavernícolas, de acordo com Guimarães e Ferreira (2014). A família com ocorrência predominante em cavernas é a Phyllostomidae (52 espécies), seguida por Vespertilionidae (6), Molossidae (8), Emballonuridae (6), Mormoopidae (4), Noctilionidae (2), Furipteridae, Thyropteridae e Natalidae cada uma com uma espécie Barros e Bernard (2023), sendo que na família Natalidae e Furipteridae encontram-se as espécies sob status de ameaça na categoria vulnerável, *Natalus macrourus* e *Furipterus horrens*, respectivamente (Brasil, 2022) e *Lonchophylla dekeyseri* (Phyllostomidae) na categoria "Em Perigo – EN".

As espécies de morcegos essencialmente cavernícolas tem a característica também de formar congregações que podem variar de alguns poucos a milhares de indivíduos (Pereira *et al*., 2022). Essas cavidades com populações estáveis e excepcionais são chamadas de *bat caves* (Medellin *et al.,* 2017*)*. Em alguns casos, essas cavernas possuem densidades populacionais tão grandes que o calor corporal produzido junto à decomposição do guano por eles gerado aumenta as temperaturas internas da cavidade (Peck *et al*., 1998), ou de alguns salões que compõem a caverna, que são chamadas *hot caves* (Ladle *et al.,* 2012). No Brasil, essa condição está relacionada basicamente a espécies do gênero *Pteronotus* que possuem condições reprodutivas específicas (Rocha, 2013). Além disso, estudos recentes mostram que algumas cavernas em formação ferrífera foram e estão sendo ampliadas por processos biogênicos associados ao guano dessas grandes colônias (Piló *et al.*, 2022; Pimentel *et al,*. 2022).

No Brasil, as maiores concentrações de cavernas inseridas na formação ferrífera localizam-se nas regiões do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, e na Serra dos Carajás, no estado do Pará (Cecav, 2023). Até então, a maior parte da

There is evidence that some bat species are strongly associated with caves, whether obligately or opportunistically (Kunz, 1982), and the literature provides several ways of classifying this relationship (Arita, 1993; Guimarães; Ferreira, 2014; Voss *et al*., 2016). The most widely used classification in Brazil is that of Guimarães and Ferreira (2014), who analyzed data available in the literature on 58 species that use caves as shelter and classified them as "essentially cavernicolous" (species that shelter mainly in caves), "opportunistically cavernicolous" (species that use caves opportunistically but routinely use another type of shelter) and "non-cavernicolous". Barros e Bernard (2023) updated the number of bat species recorded in Brazilian caves to 81 and among the four bat species threatened with extinction, at least three are considered to be essentially cavernicolous according Guimarães and Ferreira (2014). The family with the most predominant occurrence in caves is Phyllostomidae (52 species), followed by Vespertilionidae (6), Molossidae (8), Emballonuridae (6), Mormoopidae (4), Noctilionidae (2), Furipteridae, and Thyropteridae and Natalidae with one species each Barros e Bernard (2023). The families Natalidae and Furipteridae each have a species under threat status in the "Vulnerable – VU" category, *Natalus macrourus* and *Furipterus horrens*, respectively (Brasil, 2022), while Phyllostomidae has one, *Lonchophylla dekeyseri*, in the "Endangered – EN" category.

Essentially cave-dwelling bat species also have the characteristic of forming congregations that can vary from a few to thousands of individuals (Pereira *et al*., 2022). These caves with stable and exceptional populations are called bat caves (Medellin *et al.,* 2017). In some cases, these caves have such high population densities that the heat produced by the decomposition of the guano they generate increases the temperature of the cave itself (Peck *et al*., 1998), or of some rooms that make up the cave, which are called *hot caves* (Ladle *et al.,* 2012). In Brazil, this condition is basically linked to species of the genus *Pteronotus* due to specific reproductive conditions (Rocha, 2013). Furthermore, recent studies show that some caves in ferriferous formations were and are being expanded by biogenic processes associated with the guano from these large colonies (Piló *et al.*, 2022; Pimentel *et al.,* 2022).

The largest concentrations of ferriferous formation caves in Brazil are located in the regions of the Quadrilátero Ferrífero, in the state of Minas Gerais, and in the Serra dos Carajás, in the state of Pará (Cecav, 2023). To date, most of the information

informação disponível sobre morcegos e cavernas para essas duas regiões é resultado de processos de licenciamento ambiental. Entretanto, esse material, apesar de público, não é facilmente acessível e, geralmente, não possui foco específico, além de ser desenvolvido, muitas vezes, com esforço amostral reduzido (Gomes *et al.*, 2015). Os poucos estudos realizados no contexto das formações ferríferas indicam uma grande diversidade de espécies de morcegos, além de uma relação complexa entre morcegos e as cavernas nesse tipo de formação (Ferreira, 2005; Gomes *et al.*, 2013, 2015; Moras *et al.*, 2014; Talamoni *et al.*, 2013; Tavares *et al.*, 2025).

Dessa forma, a preservação dos morcegos cavernícolas está associada a uma correta gestão desse ambiente e, por vezes, à preservação de um conjunto significativo de cavernas. O conhecimento relacionado a estes animais compreende uma ferramenta essencial para a tomada de decisões nos processos de licenciamento ambiental e seleção de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade nos ecossistemas subterrâneos (Barros *et al.*, 2020; Guimarães; Ferreira, 2014; Martins *et al.*, 2018).

Os morcegos estão relacionados ao ambiente de modo complexo e respondem à fragmentação do *hábitat*, à diminuição de recursos alimentares e abrigo. A alteração na composição da comunidade ocorre de forma que favorece espécies generalistas e comuns em detrimento de espécies mais vulneráveis e raras, menos tolerantes à perturbação ambiental (Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2020; Bobrowiec; Gribel, 2010).

As profundas modificações na paisagem constituem um dos impactos ambientais mais significativos, mas pouco se sabe a respeito de como os morcegos interagem com a fragmentação da paisagem, uma vez que as informações sobre os morcegos nas áreas ferríferas advêm, em sua maior parte, dos estudos ambientais exigidos em processos de licenciamento ambiental e de algumas pesquisas acadêmicas.

Para criar estratégias efetivas para a conservação de cavernas e da paisagem de entorno, são necessárias abordagens que levem em consideração conhecimentos específicos sobre as assembleias de morcegos. Diante disso, surge a necessidade de estudos integrados para preencher as lacunas de conhecimento e compreender os fatores ecológicos, fisiológicos e comportamentais do grupo e suas interações com o ambiente Tavares *et al.* (2025). Novas metodologias de pesquisa devem ser incentivadas em estudos diagnósticos e monitoramentos, colaborando para ampliar o conhecimento sobre os morcegos associados a estes importantes ecossistemas, auxiliando no

available on bats and caves for these two regions is the result of environmental licensing processes. However, this material, despite being public, is not easily accessible and generally does not have a specific focus, in addition to often being developed with reduced sampling effort (Gomes *et al.*, 2015). The few studies carried out in the context of ferriferous formations indicate a great diversity of bat species, in addition to complex relationships between bats and caves in this type of formation (Ferreira, 2005; Gomes *et al.*, 2013, 2015; Moras *et al.*, 2014; Talamoni *et al.*, 2013; Tavares *et al.*, 2025).

Thus, the preservation of cave bats is associated with the correct management of this environment and, at times, with the preservation of a significant number of caves. Knowledge related to these animals is an essential tool for decision-making in environmental licensing processes and the selection of priority areas for the conservation of biodiversity in subterranean ecosystems (Barros *et al.*, 2020; Guimarães; Ferreira, 2014; Martins *et al.*, 2018).

Bats are related to their environment in complex ways and respond to *habitat* fragmentation and reduced food and shelter resources. Changes in community composition occur in a way that favors generalist and common species to the detriment of more vulnerable and rare species that are less tolerant to environmental disturbance (Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2020; Bobrowiec; Gribel, 2010).

Profound changes to the landscape constitute one of the most significant environmental impacts, but little is known about how bats interact with landscape fragmentation, since information about bats in ferriferous areas comes, for the most part, from environmental studies required in environmental licensing processes and from some academic research.

To create effective strategies for the conservation of caves and the surrounding landscape, approaches that consider specific knowledge about bat communities are necessary. Hence, there is a need for integrated studies to fill knowledge gaps and contribute to understanding the ecological, physiological and behavioral factors of the group and their interactions with the environment Tavares *et al.* (2025). New research methodologies should be encouraged in diagnostic and monitoring studies to help expand knowledge about bats associated with these

preenchimento de lacunas e na tomada de decisões mais assertivas para a crescente demanda de conservação dos ecossistemas ferruginosos.

2 PRINCIPAIS MÉTODOS EMPREGADOS NO MONITORAMENTO DE MORCEGOS EM CAVERNAS FERRÍFERAS

Os estudos sobre os morcegos que utilizam cavernas podem ser realizados de diversas formas e utilizando variados métodos, dependendo dos objetivos que se deseja alcançar e do orçamento disponível. Dessa forma, um planejamento eficiente é fundamental para a coleta de dados de qualidade e, consequentemente, uma análise robusta desses dados (Melo; Hepp, 2008). O primeiro passo é providenciar a correta documentação, incluindo a solicitação de autorizações emitidas pelos órgãos ambientais competentes para captura, coleta e transporte de material biológico.

Quando se trata de saber quais espécies habitam determinada caverna, estamos tratando de riqueza e diversidade de espécies. O monitoramento da composição de espécies deve ser desenvolvido em todas as fases do licenciamento. O ideal é acompanhar e comparar os resultados do levantamento na área de estudo; monitorar a comunidade de morcegos em sua atividade para verificar a ocorrência de possíveis efeitos desses impactos nas cavidades e prever os impactos diretos e indiretos do empreendimento. Construir uma base de dados com a relação de espécies presentes na área de estudo, frequência e abundância das espécies são primordiais para as análises comparativas entre todas as fases de implementação do empreendimento.

Para capturar e registrar morcegos em cavidades é importante analisar qual a metodologia a ser empregada. Por isso, é importante ter acesso com antecedência a algumas informações, como características físicas e climáticas da cavidade e uma estimativa de quantidade de indivíduos, grupos ou colônias. Estas informações auxiliam na escolha dos métodos mais adequados para cada caverna. Outro ponto importante a ser considerado em relação à captura é minimizar o potencial de perturbações aos morcegos. Uma vez que os morcegos sejam capturados, é necessário o cuidado para garantir que a manipulação seja feita de forma rápida, inofensiva e segura, minimizando o estresse ou mesmo eventuais lesões. O bem-estar do morcego deve ser considerado como uma prioridade em qualquer método utilizado.

Vários métodos descritos abaixo podem lesionar os morcegos se usados de forma descuidada, e devem ser empregados

important ecosystems, with the aim of filling knowledge gaps and contributing to more assertive decisions for the growing demand for the conservation of ferruginous ecosystems.

2 MAIN METHODS USED IN MONITORING BATS IN FERRIFEROUS CAVES

Studies on bats that use caves can be carried out in different ways and using different methods, depending on the objectives to be achieve and the available budget. Therefore, good planning is essential for collecting good data and, consequently, for good analysis (Melo; Hepp, 2008). The first step is to provide correct documentation, including requests for authorizations issued by the responsible environmental agencies for capture, collection and transportation of biological material.

Knowing which species inhabit a given cave deals with species richness and diversity. Monitoring species composition should be carried out at all stages of the licensing process. Ideally, the results of a survey in a study area should be monitored and compared; the bat community should be monitored during its activity to check for possible effects of impacts on caves and to predict the direct and indirect impacts of a project. Building a dataset with the list of species recorded in the study area, their frequency and abundance are essential for comparative analyses between all phases of the project's implementation.

It is important to analyze which methodology to use to capture bats in caves. This requires access to certain information in advance, such as the physical and climatic characteristics of the cave and an estimate of the number of individuals, groups or colonies. This information helps to choose the most suitable methods for each cave. Another important point to be considered in relation to capture is the minimization of the potential for disturbance to bats. When bats are handled, care must be taken to ensure that handling is done quickly, harmlessly and safely, minimizing stress and even possible injuries. The bat's welfare must be considered a priority in any method used.

Several of the methods described below can injure bats if used carelessly and so they should be used only when fully

somente quando totalmente justificados. Deve-se ter cuidado especial quando fêmeas grávidas forem capturadas, pois elas podem dar à luz ou abortar seus fetos enquanto estiverem sendo manipuladas. É importante destacar que os métodos de captura em cavernas brasileiras, utilizando armadilhas, devem seguir o disposto na Resolução 301/2012 do Conselho Federal de Biologia (CFBio).

2.1 Métodos de captura e registro

Coleta ativa

• Com auxílio de pinções

Esse método é utilizado para capturar morcegos em abrigos, geralmente em fendas de rochas e cavidades (Barbour; Davis, 1969; Griffin, 1940). Os morcegos são extraídos das fendas com a utilização de uma pinça de metal longa (30 centímetros ou mais). Sua vantagem é ser um método muito simples e fácil de transportar, apesar de pouco utilizado. A desvantagem é o tempo de captura, pois só é possível capturar um indivíduo por vez e requer habilidade para não causar nenhum tipo de lesão no indivíduo.

• Com auxílio de puçá e similares *(hand-nets)*

Os puçás, também chamados de rede de mão (*hand-nets*), são utilizados para capturar morcegos em abrigos cujas aberturas são pequenas. Em geral, o saco é de algodão, nylon de malha fina ou outro material flexível, com profundidade de 50 a 85 centímetros; um aro de 45 cm de diâmetro; o cabo geralmente é de alumínio, mas já foram descritos usos em PVC, madeira e taquara (Kunz; Kurta, 1988). As redes de mão (*hand-nets*) com cabos de comprimento ajustáveis são bem eficientes para a captura de morcegos em cavernas (Bels, 1952; Barbur; Davi, 1969; Kunz, 1973; Tuttle, 1975, 1976) (Figura 1). A vantagem desse método consiste em capturar muitos indivíduos ao mesmo tempo, sendo as redes de mão dobráveis e fáceis de transportar. A desvantagem está principalmente associada à destreza do pesquisador no manuseio, pois requer rapidez e precisão em seu uso. Além disso, por capturar muitos indivíduos de uma só vez, pode promover um ambiente favorável a injúrias.

justified. Special care should be taken when capturing pregnant females, as they may give birth or abort their fetuses while being handled. It is important to note that the use of capture methods that employ traps in Brazilian caves must follow the provisions of Resolution 301/2012 of the Conselho Federal de Biologia (CFBio).

2.1 Capture and recording methods

Active collection

• Tweezers/forceps

This method is used to capture bats in shelters, usually in rock crevices and cavities (Barbour; Davis, 1969; Griffin, 1940). Bats are extracted from crevices using long metal tweezers/forceps (30 centimeters long or more). Its advantage is that it is a very simple and easy-to-transport method, although it is little used. Disadvantages include capture time, since it is only possible to capture a single individual at a time, and it requires skill to avoid causing any type of injury to the individual.

• Hand-nets or similar equipment

Hand-nets (puçás) are used to capture bats in shelters with small openings. In general, hand-nets comprise the following: a bag made of cotton, fine-mesh nylon or other flexible material, with a depth of 50 to 85 centimeters; a ring of 45 cm in diameter; and a handle usually made of aluminum, but uses of PVC, wood and bamboo have been described (Kunz; Kurta, 1988). Hand-nets with adjustable length handles are very efficient for capturing bats in caves (Bels, 1952; Barbur; Davi, 1969; Kunz, 1973; Tuttle, 1975, 1976) (Figure 1). Advantages of hand-nets include the ability to capture many individuals at the same time and the fact that they foldable and easy to transport. A disadvantage is dependence on researcher dexterity in their handling, as they require speed and precision in their use. Furthermore, capturing many individuals at once can create a situation that is conducive to injuries.

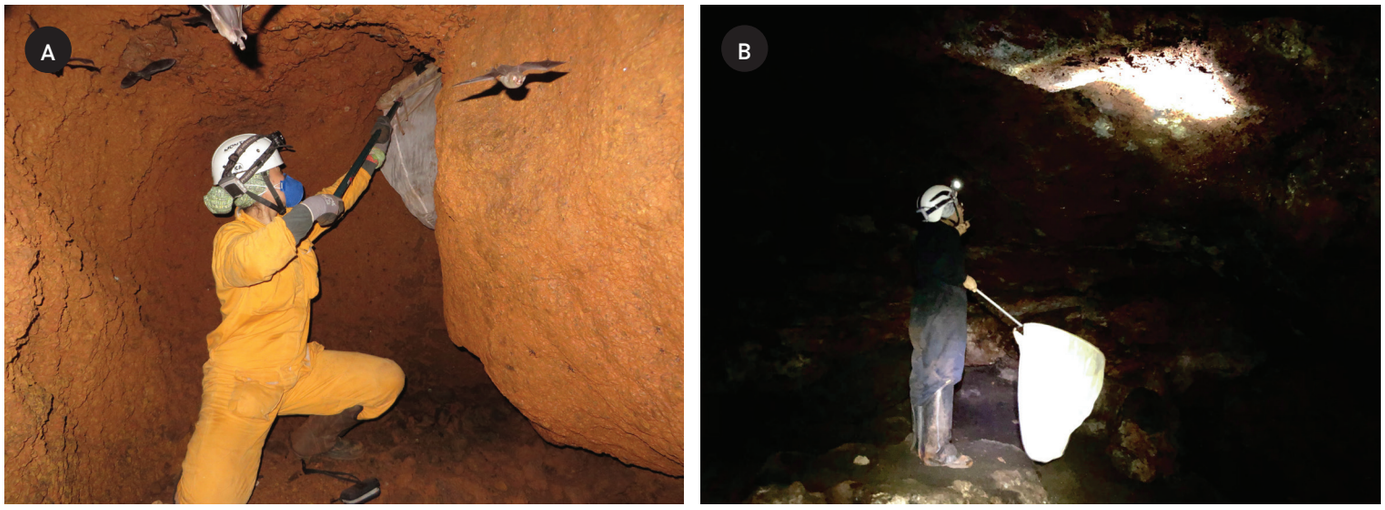


Figura 1: Captura com utilização de puçá. Fotos: A: Acervo Vale S.A. B: Thayse C. M. Benathar.
Figure 1: Capture using a hand-net. Photos: A: Vale S.A. Collection. B: Thayse C. M. Benathar.

Coleta passiva

• Redes de neblina (*mist net*)

Esse método é o mais comum para a captura de morcegos em ambientes epígeos. Sua utilização em cavernas deve ser cautelosa, não sendo indicado o uso em cavidades com grandes congregações de morcegos, pois existe a possibilidade de capturar muitos indivíduos em um período curto, ocasionando estresse ou até a morte de alguns indivíduos pela demora em extrair todos os animais da rede.

O local para instalação da rede deve ser definido sempre de acordo com o objetivo do estudo. É necessário avaliar o local mais adequado pensando em minimizar fatores que possam enviesar a amostragem. Por exemplo, redes de neblina instaladas na direção da entrada da cavidade, mas do lado de fora dela, pode capturar não só os morcegos que se abrigam em um determinada caverna, mas também aqueles que forrageiam próximo a ela. Dessa forma, a fauna amostrada poderia não corresponder ao que se deseja avaliar.

As redes de neblina são constituídas de nylon ou poliéster. Os tamanhos variam um pouco de acordo com a marca, mas geralmente estão disponíveis em comprimentos padrão de 6, 9, 12 e 18 metros, e, geralmente, com 2,5 a 3,0 metros de altura. A altura da rede é dividida em bolsos ou bolsas por 3–5 cordões horizontais presos pela guia que percorrem todo o comprimento da rede. Normalmente os morcegos ficam presos nesses bolsos

Passive collection

• Mist net

This method is the most common for capturing bats in epigean environments. Its use in caves should be done with caution and in caves with large assemblages of bats is not recommended due to the possibility of capturing many bats in a short period of time, causing stress or even death to some individuals due delay in extracting all the animals from the net.

The location for installing the net should always be determined according to the objective of the study. The most suitable location should be evaluated in order to minimise factors that could bias the sampling. For instance, mist nets positioned in front of a cave entrance can capture not only the bats that shelter inside it, but also those that forage nearby. Consequently, the fauna sampled may not correspond to the intended evaluation.

Mist nets are made of nylon or polyester. Sizes vary somewhat by brand, but they are generally available in standard lengths of 20, 30, 40, and 60 feet, and are typically 8 to 10 feet high. The height of the net is divided into pockets or pouches by three to five horizontal cords attached to the guide that run the length of the net. Bats are typically trapped in these loose pockets of the net (Figure 2). Mist nets are available in a variety of mesh sizes (the space between knots), but the most common sizes

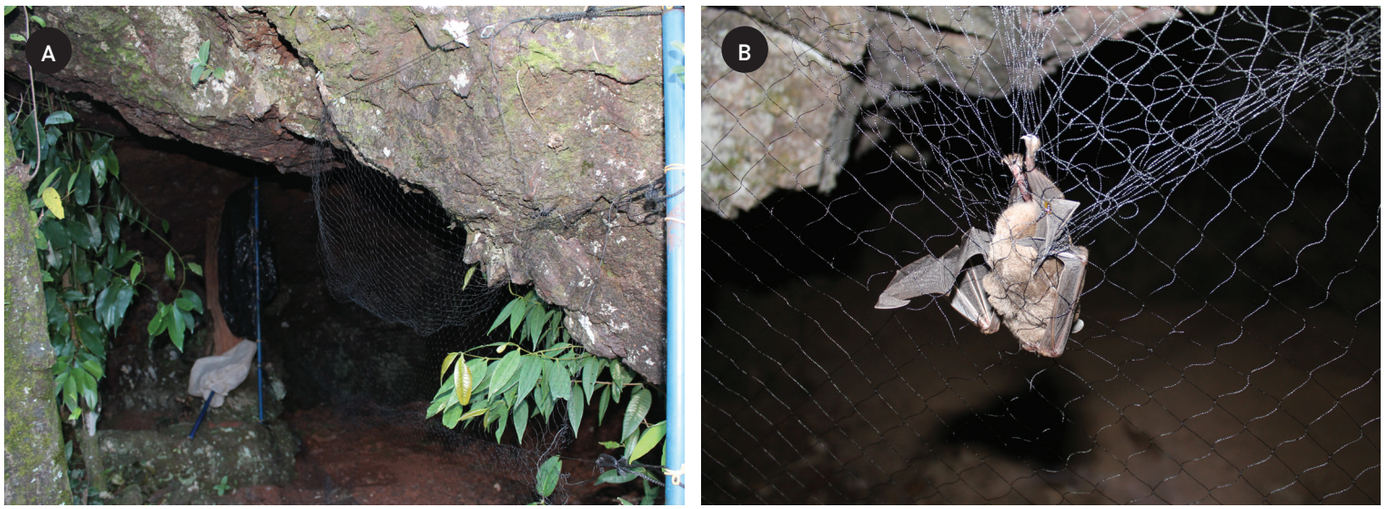


Figura 2: Utilização de redes de neblina em cavernas. A) rede instalada na caverna. B) Morcego capturado durante o estudo. Fotos: Acervo Vale S.A.
Figure 2: Use of mist nets in caves. A) Net installed at the cave. B) Bat captured during the study. Photos: Vale S.A. collection.

soltos da rede (Figura 2). As redes estão disponíveis em diferentes tamanhos de malha (espaço entre os nós), mas os tamanhos comumente utilizados para capturar morcegos são 20, 36 ou 38 milímetros. Redes com malhas menores são mais fáceis de serem detectadas pelos morcegos, e com malhas maiores podem permitir que os morcegos voem através da rede ou se desvencilhem dela facilmente.

As vantagens desse método para a sua utilização em cavernas é que as redes de neblina são muito eficazes para capturar morcegos, pois são leves e facilmente transportáveis quando dobradas em pequenos sacos e de fácil disposição. As desvantagens consistem em demandar espaço para serem instaladas (obstáculo para locais com pouca área disponível), requerer supervisão contínua e ser estressante para os morcegos pelo tempo de contenção até a sua total remoção. Por emitirem ecolocalização mais especializada, os morcegos insetívoros são capturados em menor frequência pela rede-de-neblina (Appel *et al.*, 2021).

• Rede do tipo harpa *(harp trap)*

As armadilhas do tipo harpa foram desenvolvidas para coletar muitos morcegos em um tempo relativamente curto (Constantine, 1958, 1969; Constantine; Villa, 1962), para amostrar os morcegos que forrageiam ao nível de dossel em ambientes externos e algumas famílias de morcegos insetívoros aéreos (Berry *et al.*, 2004). No entanto, o seu uso diretamente nos abrigos mostrou-

used to capture bats are 0.84, 0.15, or 0.15 inches (20, 36, or 38 millimeters). Smaller mesh sizes are easier for bats to detect, while larger mesh sizes may allow bats to fly through the net or escape from it more easily.

The advantages of this method for use in caves are that mist nets are very effective in capturing bats, as they are light and easily transportable when folded into small bags and easy to store. The disadvantages are that they require space to be installed (an obstacle in places with little available space), require continuous supervision and are stressful for the bats during the time they are contained until they are completely removed. Insectivorous bats are captured less frequently by mist nets because they emit more specialised echolocation (Appel *et al.*, 2021).

• Harp trap

Harp traps were developed to collect many bats in a relatively short time (Constantine, 1958, 1969; Constantine; Villa, 1962), to sample bats foraging at canopy level in outdoor environments and some families of aerial insectivorous bats (Berry *et al.*, 2004).. However, their use directly at roosts has proven to be

se bastante eficiente, particularmente nas entradas, onde muitos indivíduos estão saindo simultaneamente (Arbuthnott; Brigham, 2007; Garroway; Broders, 2008; Schowalter, 1980). Para obter maior sucesso nas capturas, sugerimos a utilização de várias telas de sombreamento 50% (tipo sombrite) para fechar possíveis passagens e conduzir a saída dos morcegos para a harpa (na forma de funil, Figura 3).

A harpa, nas cavernas, pode ser um importante aliado nas capturas, substituindo a utilização de redes de neblina em cavidades com colônias muito numerosas, pois a retirada dos morcegos capturados é fácil e rápida, bem como sua remoção (desmonte), se necessário. Geralmente, essas armadilhas consistem em uma estrutura quadrada de tubo de metal de 2 X 2 metros que suporta duas estruturas de linha de pesca de

quite efficient, particularly at entrances where many individuals are exiting simultaneously (Arbuthnott; Brigham, 2007; Garroway; Broders, 2008; Schowalter, 1980). To achieve greater capture success, we suggest using several 50% shading clothe to close possible passages and direct bats to the harp trap (funnel-shaped, Figure 3).

Harp traps can be an important ally for capturing bats in caves, replacing the use of mist nets in caves with very large colonies, since the removal of captured bats is easy and quick, as well as its removal (dismantling), if necessary. These traps generally consist of a square metal-tube frame measuring 2 x 2 meters that supports two structures of monofilament fishing



Figura 3: A) Armadilha de harpa (*harp trap*). B) Utilização de sombrite para direcionamento do fluxo de morcegos para a armadilha. C) Captura com utilização de armadilha de harpa. D) Morcegos capturados, no interior do bolsão. Fotos: Thayse C. M. Benathar.
Figure 3: A) Harp trap. B) Use of shading screen to direct the flow of bats to the trap. C) Capture using a harp trap. D) Bats captured inside the collection bag. Photos: Thayse C. M. Benathar.

monofilamento amarrados verticalmente (2 milímetros). Um saco coletor branco de polietileno (material escorregadio e que dificulta a escalada dos morcegos para alçarem voo) fica preso abaixo da moldura (Figura 3). Durante o voo, os morcegos colidem com as linhas e deslizam por elas até caírem no saco coletor. A armadilha funciona com base no princípio de que as estruturas de linhas finas confundem os chamados de ecolocalização dos morcegos. Os morcegos podem conseguir voar através do primeiro conjunto de linhas, mas têm dificuldade em evitar o segundo conjunto. As linhas são tensionadas para que os morcegos não fiquem emaranhados. Esse método apresenta vantagens para o uso em cavidades, devido à possibilidade de ser utilizado diretamente na entrada das cavernas com baixo potencial de causar danos aos morcegos; a remoção dos indivíduos capturados do saco coletor é rápida, gerando menos estresses, e a armadilha é de fácil manutenção. As desvantagens do método estão relacionadas: i) ao peso da armadilha, o que pode requerer adaptações logísticas para viabilizar seu uso; ii) sua área de captura é relativamente pequena em comparação com as redes de neblina; iii) algumas espécies de morcegos que usam chamadas de ecolocalização de alta frequência podem ser mais difíceis de capturar Berry *et al.*, (2004), pois passam facilmente pelas linhas de nylon, como é o caso de *Furipterus horrens;* IV) requer experiência na montagem e manutenção da armadilha. Outro aspecto importante é minimizar a perturbação da luz e do ruído próximo da armadilha, mas se manter por perto para capturar os morcegos que podem eventualmente fugir do saco coletor.

• Detectores de ultrassom, filmagens, fotografias e câmeras termais

Esses métodos possuem ampla aplicabilidade tanto para estudos de diagnósticos como em monitoramentos. Podem ser utilizados para identificar a presença dos animais, descrever comportamentos de atividade e horários de saída e retorno das cavernas, a forma de uso de um abrigo, auxiliar na identificação da riqueza de espécies que usam determinado abrigo (detectores de ultrassom), estimativa do tamanho da colônia, entre outros. Como todos os métodos, possuem vantagens e desvantagens e serão mais bem detalhados no tópico a seguir.

3 MANEJO E IDENTIFICAÇÃO DOS MORCEGOS CAPTURADOS

Para remover o morcego, seja qual for o método escolhido, é necessário treinamento e paciência, principalmente em redes de

line tied vertically (2 millimeters). A white polyethylene collection bag (a slippery material that makes it difficult for bats to climb to take flight) is attached below the frame (Figure 3). During their flight, the bats collide with the lines and slide down them until they fall into the collection bag. The trap works based on the principle that thin line structures confuse the echolocation calls of bats. Bats may be able to fly through the first set of lines but have difficulty avoiding the second set. The lines are tensioned so that the bats do not become entangled. This method has advantages for use in caves because it can be used directly at the cave entrance without causing harm to the bats; the removal of captured individuals from the collection bag is quick, generating less stress; and the trap is easy to maintain. The disadvantages are related to: i) the weight of the trap, which may require logistical adaptations to make its use viable; ii) the relatively small capture area compared to mist nets; and iii) some species of bats that use high-frequency echolocation calls may be more difficult to capture Berry *et al.*, (2004), as they easily pass through nylon lines, as is the case of *Furipterus horrens;* IV) require experience in setting up and maintaining the trap. Another important aspect is minimize disturbance from light and noise near the trap, but stay close to capture any bats that might escape from the collection bag.

• Ultrasound detectors, filming, photography and thermal cameras

These methods have wide applicability for both diagnostic studies and monitoring. They can be used to identify the presence of animals, describe activity behaviors and times of leaving and returning from the caves, determine the way they use a shelter, help identify the richness of species that use a given shelter (ultrasound detectors), and estimate colony size, among other applications. Like all methods, they have advantages and disadvantages and will be further detailed in the following topic.

3 HANDLING AND IDENTIFICATION OF CAPTURED BATS

Removing a bat, regardless of the method of capture, requires training and patience, especially when using mist nets since bats

neblina, já que ao se movimentarem tentando se desvencilhar da rede, podem ficar ainda mais embolados (Pacheco, 2004). Após sua retirada, os morcegos devem ser colocados individualmente em sacos para contenção feitos de tecido de algodão e fechados por cordão. Nunca se deve colocar indivíduos de espécies diferentes juntos, e deve-se evitar colocar mais de um indivíduo no mesmo saco, ainda que pertencentes à mesma espécie. Feito isso, deve-se proceder à tomada de informações necessárias para a identificação taxonômica, tais como medidas corporais (tamanho do antebraço, comprimento do corpo, peso, entre outros), sexo, dentição, condição reprodutiva, idade (jovens ou adultos) (Brunet-Rossini; Wilkinson, 2009). Essas informações, juntamente com boas imagens fotográficas (do indivíduo e, se possivel, de caracteres taxonômicos relevantes), são primordiais e auxiliam na correta identificação e registro das espécies.

Na identificação das espécies de morcegos, diversos fatores contribuem para que as capturas sejam praticamente indispensáveis. Poucas espécies são conspícuas o suficiente para serem identificadas à distância. Mesmo com os espécimes em mãos há dificuldades, podendo a identificação ser confirmada apenas através do exame de caracteres dentários, cranianos e penianos, o que, nesses casos, exigiria a coleta de pelo menos um exemplar para uma identificação precisa em laboratório. Há casos em que, para obter a identificação da espécie, a morfologia não é o suficiente, tendo que recorrer a outros métodos para chegar à confirmação, como por exemplo, através de estudos genéticos (moleculares) ou de ecolocalização (chamados espécie-específicos). A identificação taxonômica apenas através de fotos feitas do exemplar em seu ambiente (cavernas) não é confiável e nem recomendável, mesmo em se tratando de gêneros monotípicos.

Existem algumas chaves taxonômicas que são utilizadas para a correta identificação e registro de morcegos brasileiros, com enfoque na América do Sul (Díaz *et al.*, 2016; Gardner, 2007), Brasil (Reis *et al.*, 2017; Vizotto; Taddei, 1973), e algumas delas possuem enfoque em táxons específicos, como por exemplo: Emballonuridae (Jones; Hood, 1993), Molossidae (Gregorin; Taddei, 2002), *Cynomops* (Moras *et al.*, 2018), *Diclidurus* (Ceballos; Medellín, 1988), *Chiroderma* (Garbino *et al.*, 2020b), *Sturnira* (Giannini; Barquez, 2003), *Micronycteris* (Simmons, 1996), *Lasiurus* (Shump Jr.; Shump, 1982), *Lonchorhina* (Lassieur; Wilson, 1989), *Lonchophylla* (Moratelli; Dias, 2015), *Hsunycteris* (Velazco *et al.*, 2017), *Mimon* (Ortega; Arita, 1997), *Platyrrhinus* (Ferrell; Wilson, 1991), *Myotis* (Moratelli, 2009) e *Eumops* (Eger, 1977).

can become even more tangled when they move around trying to free themselves from the net (Pacheco, 2004). Once removed, the bats should be placed individually in containment bags made of cotton fabric, which are then closed with a drawstring. Individuals of different species should never be placed together, and more than one individual per bag should be avoided, even if they belong to the same species. Information necessary for taxonomic identification should then be collected, such as body measurements (forearm size, body length, weight, among others), sex, dentition, reproductive condition and age (young or adult) (Brunet-Rossini; Wilkinson, 2009). This information, together with good photos (of the individual and, if possible, of relevant taxonomic traits), is essential and helps to correctly identify and record the species.

Several factors contribute to making captures practically indispensable to identifying bat species. Few species are conspicuous enough to be identified from a distance. Still, even with specimens in hand there are difficulties with identification, as confirmation can only be achieved by examining dental, cranial and penile characteristics, which requires the collection of at least one specimen for a accurate laboratory identification. In some cases, morphology is insufficient to identify species, and other methods (called species-specific) must be used to confirm identification, such as genetic (molecular) or echolocation studies. Taxonomic identification using only photos taken of a specimen in its environment (caves) is not reliable and is not recommended, even in the case of monotypic genera.

There are taxonomic keys that are useful for the correct identification and recording of Brazilian bats. Some focus on South America (Díaz *et al.*, 2016; Gardner, 2007) or Brazil (Reis *et al.*, 2017; Vizotto; Taddei, 1973), while others focus on specific taxa, such as Emballonuridae (Jones; Hood, 1993), Molossidae (Gregorin; Taddei, 2002), *Cynomops* (Moras *et al.*, 2018), *Diclidurus* (Ceballos; Medellín, 1988), *Chiroderma* (Garbino *et al.*, 2020b), *Sturnira* (Giannini; Barquez, 2003), *Micronycteris* (Simmons, 1996), *Lasiurus* (Shump Jr.; Shump, 1982), *Lonchorhina* (Lassieur; Wilson, 1989), *Lonchophylla* (Moratelli; Dias, 2015), *Hsunycteris* (Velazco *et al.*, 2017), *Mimon* (Ortega; Arita, 1997), *Platyrrhinus* (Ferrell; Wilson, 1991), *Myotis* (Moratelli, 2009) and *Eumops* (Eger, 1977).

Havendo a necessidade de coleta de animais, devem ser usados métodos de eutanásia permitidos pela legislação ambiental brasileira e previamente descrita na autorização de captura e coleta. Nesse sentido é importante consultar o artigo 8º da resolução nº 301 do CFBio, e o artigo 7º da Resolução nº 1.000 do Conselho Federal de Medicina Veterinária (CFMV), onde são descritos detalhes sobre os procedimentos legais e princípios éticos relacionados à eutanásia. Após a morte do animal, quando se deseja preservá-lo em líquido, o exemplar é fixado em formol a 10%, e após retirar o morcego do formol, lava-se em água corrente, e coloca-se em álcool 70% (Nagorsen; Peterson, 1980; Vizotto; Taddei, 1973). Após a fixação, os exemplares deverão ser incorporados a coleções zoológicas, seguindo o preestabelecido no projeto aprovado e vinculado às licenças de captura e coleta e às regras da instituição receptora (Pereira *et al.*, 2022).

4 MÉTODOS UTILIZADOS EM PROGRAMAS DE MONITORAMENTO

4.1 Métodos de marcação

Existem variados métodos de marcação de morcegos que podem ser classificados como de curto ou longo prazo, ou marcações denominadas temporárias e semipermanentes (Esbérard, 2003; Gannon, 1993; Gannon; Sikes, 2007; Pereira

If animals must be collected, methods of euthanasia permitted by Brazilian environmental legislation, and previously described in the capture and collection authorization, must be used. It is important to consult Article 8 of Resolution No. 301 of CFBio, and Article 7 of Resolution No. 1,000 of the Conselho Federal de Medicina Veterinária (CFMV), which describe details on the legal procedures and ethical principles related to euthanasia. When liquid preservation of the deceased animal is desired, the specimen is fixed in 10% formalin, washed in running water and then placed in 70% alcohol (Nagorsen; Peterson, 1980; Vizotto; Taddei, 1973). Fixed specimens must be incorporated into zoological collections, following the pre-established provisions of the approved project, and linked to the capture and collection licenses and the rules of the receiving institution (Pereira *et al.*, 2022).

4 METHODS USED IN MONITORING PROGRAMS

4.1 Marking methods

There are various methods for marking bats that can be classified into short- and long-term, or markings called temporary and semi-permanent (Esbérard, 2003; Gannon, 1993; Gannon; Sikes, 2007; Pereira *et al.*, 2022). Examples of temporary



Figura 4: Uso do método de marcação temporária por descoloração de pelos do dorso. Fonte: Silva *et al*. 2007.
Figure 4: Use of the temporary marking method of bleaching hair on the back. Source: Silva *et al.* (2007).



Figura 5: Uso de método de marcação semipermanente: A) colar com anilha metálica. B-C) anilha metálica de antebraço. Fotos: A) Aline S. Reis, B) Mariane S. R. Pereira, C) Acervo Vale S.A.

Figure 5: Use of semi-permanent marking methods: A) collar with metal ring. B-C) metal ring on forearm. Photos: A) Aline S. Reis, B) Mariane S. R. Pereira, C) Acervo Vale S.A.

et al., 2022). Exemplos de marcações temporárias são: uso de tintura ou descoloração do pelo (Silva *et al.*, 2007), corte do pelo, pintura de unhas e a realização de pequenos furos no uropatágio (Pereira *et al.*, 2022). Exemplos de marcação semipermanentes: anilhas no antebraço, colares com anilhas (Barros *et al.*, 2012; Kunz; Weise, 2009; Pacheco, 2004). Temos ainda as etiquetas *PIT TAG* (*microchip*) como semipermanente, mas descreveremos mais detalhadamente na seção da telemetria.

A escolha do método de marcação deve ser de acordo com os objetivos do estudo, bem como as características das espécies, como tamanho, forma corporal e hábitos (Pacheco, 2004; Pereira *et al.*, 2022). Grande parte dos trabalhos tem utilizado anilhas metálicas numeradas, sendo preferível a utilização de marcas individualizadas que permitam a identificação do pesquisador ou projeto responsável por aquela captura. Como são marcadores de custo baixo é possível marcar milhares de indivíduos, aumentando as possibilidades de recaptura. Esse método é eficiente como marcação a longo prazo, principalmente para monitoramentos contínuos. Porém, como apontado por Pereira e colaboradores (2022), a utilização de uma técnica de marcação inadequada ou a inobservância de questões específicas do animal podem comprometer o desenvolvimento e atividades vitais dos morcegos, além de causar danos permanentes e incapacitantes (Barros *et al.*, 2012).

Inventários e monitoramentos de morcegos em cavernas têm sido conduzidos principalmente por meio de captura-marcação-recaptura (CMR). Essa metodologia pode possibilitar, por exemplo, a aquisição de informações importantes sobre estimativas de idade dos indivíduos, período reprodutivo e tamanho populacional (Reis *et al.*, 2022; Trajano, 1996), informações sobre padrão do uso de habitat (Bernard; Fenton, 2003; Trajano, 1996), capacidade de deslocamento (Leal; Bernard, 2021; Trajano, 1996). Esse método permite ainda avaliar a taxa de infestação por ectoparasitas (Reis *et al.*, 2021), fidelidade ao abrigo, entre outros (Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2021; Gomes, 2014; Gomes *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2022; Torquetti *et al.*, 2017).

Devido à grande quantidade de cavernas no Brasil, podemos dizer que há poucos estudos sobre morcegos em cavernas brasileiras que incluem dados de marcação (Arnone, 2008; Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2021; Bredt *et al.*, 1998; Gomes, 2014; Gomes *et al.*, 2013; Leal; Bernard, 2021a; Reis *et al.*, 2021, 2022; Rosada *et al.*, 2015; Silva, 2013; Torquetti *et al.*, 2013, 2017; Trajano, 1985, 1995, 1996). Para cavernas em formações ferríferas a literatura disponível é ainda menor (Gomes *et al.*, 2015).

markings include hair dye or bleaching (Silva *et al.*, 2007), cutting hair, painting nails and making small holes in the uropatagium (Pereira *et al.*, 2022). Examples of semi-permanent markings include forearm rings and ringed collars (Barros *et al.*, 2012; Kunz; Weise, 2009; Pacheco, 2004). Also considered semi-permanent are PIT tags (microchips), which we will describe in more detail in the telemetry section.

The choice of marking method should be in accordance with the objectives of the study, as well as the characteristics of the species, such as size, body shape and habits (Pacheco, 2004; Pereira *et al.*, 2022). Most studies have used numbered metal rings, ideally with individualized marks that identify the researcher or project responsible for the capture. Since they are low-cost markers, thousands of individuals can be marked, thereby increasing the chances of obtaining recaptures. This is an efficient long-term marking method, especially for continuous monitoring. However, as pointed out by Pereira and collaborators (2022), the use of an inadequate marking technique or the failure to observe specific issues of the animal can compromise the development and vital activities of bats, as well as cause permanent and disabling damage (BARROS *et al.*, 2012).

Inventorying and monitoring bats in caves have been conducted mainly through capture-mark-recapture (CMR). This methodology can enable, for example, the acquisition of important information on estimates of individual age, reproductive period and population size (Reis *et al.*, 2022; Trajano, 1996), as well as information on patterns of habitat use (Bernard; Fenton, 2003; Trajano, 1996) and movement capacity (Leal; Bernard, 2021; Trajano, 1996). This method also allows the evaluation of ectoparasite infestation rates (Reis *et al.*, 2021) and shelter fidelity, among other aspects (Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2021; Gomes, 2014; Gomes *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2022; Torquetti *et al.*, 2017).

Given the large number of caves in Brazil, there have been relatively few studies on bats in Brazilian caves that include tagging data. (Arnone, 2008; Barros; Bernard, 2023; Barros *et al.*, 2021; Bredt *et al.*, 1998; Gomes, 2014; Gomes *et al.*, 2013; Leal; Bernard, 2021a; Reis *et al.*, 2021, 2022; Rosada *et al.*, 2015; Silva, 2013; Torquetti *et al.*, 2013, 2017; Trajano, 1985, 1995, 1996). The available literature is even scarcer for caves in ferriferous formations, (Gomes *et al.*, 2015).

No que diz respeito aos trabalhos de consultoria ligados ao licenciamento ambiental, o uso varia de acordo com o pesquisador e não há uma padronização do método de marcação. No Brasil, infelizmente, ainda não contamos com bancos de dados ou sistema de anilhamento nacional, de forma a unificar e padronizar as marcações realizadas no país. A falta de padronização e a centralização de dados impossibilitam uma compreensão dos processos de migração e do uso do espaço e dos abrigos pelos morcegos (Pereira *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021).

Apesar das limitações do método, os programas de monitoramento em cavernas em rochas ferríferas têm apresentado resultados interessantes. Em estudo realizado em dezenas de cavernas nas regiões de Serra Sul e Serra Norte, na Serra dos Carajás, estado do Pará, a taxa de recaptura (14,4% e 14,5%, respectivamente) (Ativo Ambiental, 2024; Brandt, 2023) tem sido satisfatória quando comparada aos dados da literatura (Arnone, 2008; Barros *et al.*, 2021; Lourenço, 2011; Reis *et al.*, 2021; Santos, 2001; Trajano, 1996). Com os resultados já foi possível identificar que o mesmo indivíduo pode usar um conjunto de cavernas em um curto período, e percorrer grandes distâncias (Ativo Ambiental, 2024; Brandt, 2023). Além disso, os dados de recaptura trazem informações importantes sobre a relação de cada espécie de morcego com as cavernas, no que diz respeito à fidelidade ao abrigo. Em Serra Sul, por exemplo, *Furipterus horrens* foi a espécie com maior número de indivíduos marcados (n=490) ao longo dos oito anos de monitoramento, no entanto, apresentou-se como a espécie com menor taxa individual de recaptura (4,9%). Já *Dyphilla ecaudata*, com um número bem menor de indivíduos marcados (n=87), apresentou maior taxa individual de recaptura (56%). Esses dados demonstram a importância da utilização de anilhamento em monitoramentos de longo prazo, possibilitando a compreensão do comportamento das espécies de morcegos, suas relações e fidelidade com as cavernas e como essas relações variam com o tempo e com o avanço do empreendimento. Ao longo do tempo e com o avanço do empreendimento será possível analisar se estão ocorrendo mudanças na forma como os morcegos utilizam os abrigos, possibilitando intervenções para mitigar os possíveis efeitos negativos.

4.2 Telemetria

Outro método útil de monitoramento de morcegos é a telemetria, cuja técnica consiste, basicamente, na fixação de um transmissor de radiofrequência ou GPS (Sistema de

Uses for consultancy work related to environmental licensing vary according to the researcher, with no standardization of the marking method. In Brazil, unfortunately, there are still no databases or a national ringing system to unify and standardize the markings carried out in the country. The lack of standardization and centralization of data makes it impossible to understand migration processes and the use of space and shelters by bats (Pereira *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021).

Despite the limitations of the method, monitoring programs in caves in ferriferous rocks have shown interesting results. A study carried out in dozens of caves in the regions of Serra Sul and Serra Norte, in Serra dos Carajás, state of Pará, obtained recapture rates of 14.4% and 14.5%, respectively (Ativo Ambiental, 2024; Brandt, 2023), which are satisfactory when compared to data in the literature (Arnone, 2008; Barros *et al.*, 2021; Lourenço, 2011; Reis *et al.*, 2021; Santos, 2001; Trajano, 1996). The results made it possible to determine that an individual can use a set of caves in a short period of time and travel great distances (Ativo Ambiental, 2024; Brandt, 2023). Furthermore, the recapture data provide important information about the relationship of each bat species with caves regarding roost fidelity. In Serra Sul, for example, eight years of monitoring resulted in *Furipterus horrens* being the species with the highest number of individuals tagged (n=490), although it was also the species with the lowest individual recapture rate (4.9%). During the same monitoring, *Dyphilla ecaudata* had a much smaller number of individuals tagged (n=87), yet had the highest individual recapture rate (56%). These data demonstrate the importance of using banding in long-term monitoring, as it enables an understanding of the behavior of bat species and relationships and fidelity to the caves, and how these relationships vary over time and as the project develops. Over time, and as the project progresses, it will be possible to analyze whether changes are occurring in the way bats use roosts, and enable interventions to mitigate possible negative effects.

4.2 Telemetry

Another useful method for monitoring bats is telemetry, which basically consists of attaching a radiofrequency transmitter or GPS (Global Positioning System) to the studied animal and then

Posicionamento Global) ao animal estudado e posterior acompanhamento do sinal emitido através de antenas e receptores (Pereira *et al.*, 2022), ou via satélite (Mello, 2010; Powell; Mitchell, 2012). Na radiofrequência, temos um sinal analógico de alta frequência ou VHF (*Very High Frequency*), onde o princípio físico da transmissão de rádio é o eletromagnetismo, que compartilha várias características físicas observáveis no fenômeno da propagação da luz (Kenward, 1987). Por sua vez, os sistemas via GPS se dão via satélite durante intervalos de tempo (Mello, 2010; Powell; Mitchell, 2012).

A telemetria fornece dados sobre a área de uso dos morcegos, permite ter informações de curto prazo e de difícil acesso em relação às outras técnicas. Porém, seu uso requer o entendimento das limitações e aplicações da técnica. Nesse sentido, duas considerações são importantes: a primeira é identificar os objetivos específicos e o escopo das inferências, porque essas decisões orientarão muitas das considerações restantes, inclusive se a telemetria é uma ferramenta apropriada para alcançar os objetivos (Amelon *et al.*, 2009). A população de interesse, a área geográfica e a escala da questão proposta orientarão outras decisões, incluindo unidades experimentais apropriadas, medidas de precisão para teste de hipóteses e número de indivíduos a serem marcados (Amelon *et al.*, 2009; Garton *et al.*, 2001). A segunda consideração se refere aos componentes básicos para utilização da telemetria, como: tipos de transmissores, quais espécies de morcegos amostrar, recepção do sinal, armazenamento dos dados, e por fim, se a equipe é treinada para realização das atividades de campo e das análises posteriores. Vale destacar que é fundamental projetar o tempo para realizar as atividades de campo já que a maioria dos transmissores tem vida útil curta.

Normalmente, os transmissores são colocados na região médio-dorsal do morcego, anexado com cola cirúrgica (Barclay; Bell, 1988). Esse adesivo pode descolar em intervalo de dias a semanas e, juntamente com a duração da bateria, são fatores limitantes desse método, já que restringem a duração do monitoramento (Barclay; Bell, 1988; Wilkinson; Bradbury, 1988). É recomendável que os transmissores não pesem mais do que 10% do peso corporal do indivíduo (Amelon *et al.*, 2009). Entretanto, Aldridge e Brigham (1988) indicam que se utilize, preferencialmente, transmissores com até 5% do peso corporal do animal, para que o bem-estar e o padrão de atividade dos morcegos não sejam comprometidos.

monitoring the emitted signal through antennas and receivers (Pereira *et al.*, 2022), or via satellite (Mello, 2010; Powell; Mitchell, 2012). Radiofrequency employs an analog high frequency signal or VHF (Very High Frequency), where the physical principle of radio transmission is electromagnetism, which shares several physical characteristics observable in the phenomenon of light propagation (Kenward, 1987). In turn, GPS systems operate via satellite during time intervals (Mello, 2010; Powell; Mitchell, 2012).

Telemetry provides data on the area used by bats, provides short-term information and difficult-to-access information than other techniques. However, its use requires an understanding of the appropriate techniques and their limitations and applications. In this sense, two considerations are important. The first is identify the specific objectives and scope of inferences, because these decisions will guide many of the remaining considerations, including whether telemetry is an appropriate tool to achieve the objectives (Amelon *et al.*, 2009). The population of interest, the geographic area and the scale of the proposed question will guide other decisions, including appropriate experimental units, precision measures for hypothesis testing and number of individuals to be marked (Amelon *et al.*, 2009; Garton *et al.*, 2001). The second consideration relates to the basic components for carrying out telemetry, such as: types of transmitters, which bat species to sample, signal reception, data storage, and finally, whether the team is trained to carry out field activities and subsequent analysis. It is worth noting that it is essential to plan the time to carry out field activities, as most transmitters have a short lifespan.

Transmitters are typically placed on the mid-dorsal region of the bat and attached with surgical glue (Barclay; Bell, 1988). This adhesive peels-off within days to weeks and, together with battery life, is a limiting factor of the method, as it restricts the duration of monitoring (Barclay; Bell, 1988; Wilkinson; Bradbury, 1988). The recommended weigh of the transmitters is no more than 10% of the individual's body weight (Amelon *et al.*, 2009). However, Aldridge and Brigham (1988) indicate that transmitters weighing up to 5% of the animal's body weight should preferably be used, so that the bats' well-being and activity patterns are not compromised.

A captação dos sinais da telemetria por radiofrequência (VHF) é realizada através de triangulações de dois ou mais pontos (Piovezan; Andriolo, 2004). De acordo com esses autores a triangulação baseia-se em trigonometria: com dois ângulos (pelo menos) tomados a partir de pontos conhecidos é possível estimar a localização de um terceiro ponto (transmissor) (Piovezan; Andriolo, 2004). Pontos fixos adicionais podem ser utilizados, onde a antena fique em posição privilegiada para a captação do sinal, na maioria das vezes em pontos altos, aumentando a eficácia da cobertura da área de estudo. Contudo, os pontos fixos não têm a mesma flexibilidade das equipes, que procuram pontos ideais para realizar a triangulação, principalmente quando os animais percorrem grandes distâncias por noite ou apresentam variação no comportamento.

Estudos recentes utilizando telemetria demonstraram que a área de vida dos morcegos varia tanto espacial quanto temporalmente, sendo específica para cada espécie e fortemente influenciada pelas características do ambiente em que vivem. Na telemetria por GPS, que é um sistema mais recente, os dados são obtidos por triangulações de satélites em intervalos pré-determinados e com grande precisão, e os dados podem ser acessados de duas formas: *on line* ou UHF (*Ultra High Frequency*, ou frequência ultra alta) (Fuller, M.; Fuller, T., 2012). Nessa última, é necessário chegar a uma determinada distância do animal com o transmissor para obter uma conexão remota e assim fazer o download dos dados (Dressler *et al.*, 2016; Duda *et al.*, 2019). Esse método permite acessar um grande volume de dados, bem como as rotas de voo preferenciais, auxiliando no entendimento do padrão de uso do habitat pelos morcegos (Williams *et al.*, 2019).

O método de telemetria já tem sido utilizado em monitoramentos de populações em cavernas inseridas em formações ferríferas, com o objetivo de identificar qual o padrão de deslocamento de algumas espécies nessa paisagem. Ribeiro (2019) estudou esses padrões para a espécie *Furipterus horrens*, que se abriga em cavernas da região de Serra Norte, Serra Sul e Serra da Bocaina, estado do Pará. A caverna estudada em Serra Norte está localizada muito próximo de uma área de mineração; a da Serra Sul, em área preservada e a de Serra da Bocaina, em área antropizada com predominância de pastagem. Os resultados mostraram que não há diferença significativa nos padrões de deslocamento, nem mesmo no tamanho da área de uso necessária à manutenção da espécie nos ambientes avaliados. Ao avaliar padrões de deslocamento e uso do habitat

The capture of radiofrequency telemetry (VHF) signals is performed through triangulations of two or more points (Piovezan; Andriolo, 2004). According to these authors, triangulation is based on trigonometry: the estimation of the location of a third point (transmitter) from two angles (at least) taken from known points (Piovezan; Andriolo, 2004). Additional fixed points can be used, where the antenna is in a privileged position to capture the signal, most often at high points, increasing the effectiveness of covering the study area. However, fixed points do not have the same flexibility as teams, who look for ideal points to perform triangulation, especially when animals travel long distances at night or show variation in behavior.

Recent studies using telemetry have shown that the home range of bats varies both spatially and temporally, being specific to each species and strongly influenced by the environmental features in which that species lives. With GPS telemetry, which is a more recent system, data are obtained by the triangulation of satellites at predetermined intervals and with great precision, and the data can be accessed in two ways: online or UHF (Ultra High Frequency) (Fuller, M.; Fuller, T., 2012). For the latter, a certain distance from the animal with the transmitter needs to be reached to obtain a remote connection and download the data (Dressler *et al.*, 2016; Duda *et al.*, 2019). This method allows access to a large volume of data, as well as preferred flight routes, and thus helps to understand habitat use patterns by bats (Williams *et al.*, 2019).

The telemetry method has already been used to monitor bat populations in caves located in ferriferous formations, with the aim of identifying the movement patterns of some species in this landscape. Ribeiro (2019) studied these patterns for the species *Furipterus horrens*, which shelters in caves in the regions of Serra Norte, Serra Sul and Serra da Bocaina, in the state of Pará. The cave studied in Serra Norte is located very close to a mining area; the one in Serra Sul is in a preserved area; and the one in Serra da Bocaina is in an anthropized area with a predominance of pasture. The results showed no significant difference in movement patterns, not even in the size of the usage area necessary for the maintenance of the species in the environments evaluated. When evaluating the displacement and



Figura 6: Método de telemetria por radiofrequência. A) Antena e bússola para aferição do azimute no momento da triangulação; B) Posicionamento da equipe durante a busca de sinal; C) Morcego com o transmissor acoplado em seu dorso. Fotos: Acervo Vale.
Figure 6: Radiofrequency telemetry. A) Antenna and compass to measure the azimuth at the time of triangulation; B) Positioning of the team during signal search; C) Bat with transmitter attached to its back. Photos: Vale Collection.

pelas espécies *F. horrens* e *Lonchorhina aurita*, Tavares e colaboradores (2025) indicam que a sazonalidade influencia a forma como as espécies utilizam o espaço, mas que o grau de antropização ou preservação das paisagens no entorno das cavernas estudadas não representaram efeitos significativos no uso do espaço. Esses resultados mostram que esse método pode ser bastante útil em determinadas situações, principalmente para avaliar se o desenvolvimento de atividades no entorno do abrigo está ou não afetando os padrões de deslocamento dos indivíduos.

Outro método para rastrear morcegos é a marcação com etiquetas tipo "PIT", ou "PIT Tags" (*Transponders* integrados passivos, em inglês, *Passive Integrated Transponder*), que são *microchips* implantados sob a pele, no tecido subcutâneo (Smyth; Nebel, 2013). Essencialmente, atuam como um código de barras individual vitalício para o animal (Gibbons; Andrews, 2004; Rigby *et al.*, 2012; Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021).

As *tags* ficam inativas até serem ativadas; elas, portanto, não requerem nenhuma fonte interna de energia ao longo de sua vida útil (Van Harten *et al.*, 2021). Para ativar a *tag*, um sinal de rádio de baixa frequência é emitido por um dispositivo de varredura que gera um campo eletromagnético de curto alcance (Smyth; Nebel, 2013). A etiqueta então envia um código alfanumérico exclusivo de volta ao leitor (Keck, 1994). A aquisição de dados é bastante eficaz quando animais marcados com as etiquetas passam a poucos centímetros dos leitores, no entanto, os testes realizados por Van Harten e colaboradores (2019) com morcegos em cavernas revelou que os leitores foram capazes de registrar dados de etiquetas a 1,05 metro de distância. Os *scanners* (leitores) estão disponíveis como os modelos de mão, portáteis, movidos a bateria e como os modelos estacionários e automatizados (Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021). É uma ferramenta eficiente para responder perguntas sobre taxas de crescimento, sobrevivência, teias alimentares e padrões de movimento (Rigby *et al.*, 2012; Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021). Uma grande vantagem desse método comparado a outros métodos de marcação é que não é necessário recaptura dos indivíduos (Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2019).

O desenvolvimento tecnológico e a miniaturização dos transmissores têm criado várias possibilidades de coleta de dados para estudar os morcegos, desde VHF (Kenward, 2001) e tecnologia GPS – com *download* de radiofrequência ou integrado a sistemas de satélite – (Kays *et al.*, 2015; Tomkiewicz *et al.*, 2010), a redes de sensores e receptores acústicos para rastreamento

habitat use patterns of the *F. horrens* and *Lonchorhina aurita* species, Tavares et al. (2025) indicated that seasonality influenced their spatial usage, though the degree of anthropisation or preservation of the surrounding landscapes did not significantly affect their spatial usage. These results show that this method can be quite useful in certain situations, especially for assessing whether or not the development of activities around a shelter is affecting the movement patterns of individuals.

Another method for tracking bats is tagging with PIT (Passive Integrated Transponder) tags, which are microchips implanted in subcutaneous tissue (Smyth; Nebel, 2013). PIT tags essentially serve as a lifelong individual barcode for the individual animal (Gibbons; Andrews, 2004; Rigby *et al.*, 2012; Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021).

PIT tags remain inactive until activated, and so do not require any internal power source throughout their useful life (Van Harten *et al.*, 2021). PIT tag activation is via a low-frequency radio signal emitted by a scanning device that generates a short-range electromagnetic field (Smyth; Nebel, 2013). Upon activation, the tag sends a unique alphanumeric code back to the reader (Keck, 1994). Data acquisition is quite effective when tagged animals pass within a few centimeters of readers, however, tests carried out by Van Harten and collaborators (2019) with bats in caves revealed that readers were able to record data from tags at a distance of 1.05 meters. Scanners (readers) are available as handheld, portable, battery-powered models and as stationary and automated models (Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021). PIT tags are an efficient tool for answering questions about growth rates, survival, food webs and movement patterns (Rigby *et al.*, 2012; Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2021). A major advantage of this method over other mark-recapture methods is that marked animals do not need to be recaptured (Smyth; Nebel, 2013; Van Harten *et al.*, 2019).

Technological development and the miniaturization of transmitters have created several possibilities for collecting data to study bats, from VHF (Kenward, 2001) and GPS technology – with radiofrequency download or integrated with satellite systems – (Kays *et al.*, 2015; Tomkiewicz *et al.*, 2010), to sensor networks and acoustic receivers for animal tracking (Duda *et al.*,

de animais (Duda *et al.*, 2018; Hoenner *et al.*, 2018; Řeřucha *et al.*, 2015). Porém, assim como as marcações por anilha, não há no Brasil um protocolo que possa ajudar no desenvolvimento de melhores práticas e técnicas, e que auxilie nas respostas aos questionamentos ecológicos ligados a monitoramentos de curto e longo prazo.

4.3 Bioacústica

A bioacústica é definida como o estudo da emissão, propagação e recepção de sons por animais (Sueur *et al.*, 2014; Towsey *et al.*, 2014), e trata-se de um campo de estudo interdisciplinar ligada à etologia, fisiologia, evolução e a outros campos da biologia (Adams; Pedersen, 2013; Fenton *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2014). Esses sons ou sinais acústicos são utilizados por diversos animais em diversas situações, formas e contextos (Pereira *et al.*, 2022), como por exemplo, na defesa de território, na atração do parceiro sexual, nas interações de grupos e em outras situações (Ahlén; Baag, 1999; Fenton *et al.*, 1987).

Como os morcegos usam a ecolocalização para forragear e navegar pelos ambientes, eles precisam emitir chamados de ultrassom continuamente quando ativos no voo (Fenton, 2013). Esta produção constante de sons permite que os pesquisadores utilizem esses dados acústicos para registrar a ocorrência do morcego e, inclusive em alguns grupos, identificar quais espécies estão presentes naquele tempo e espaço (Jones, 1999). Os morcegos apresentam uma grande diversidade acústica, variando de frequência de 8 a 200 kHz (Altringham, 2011), e é expressa em dois níveis: (a) variação interespecífica, representada pelas diferenças estruturais dos chamados entre as espécies de morcegos (Figura 7), e (b) intraespecífica, representada pelas diferenças de uma espécie em distintos contextos espaciais e temporais (Jones; Holderied, 2007; Russo *et al.*, 2018).

Essas variações dos chamados de ecolocalização podem ser registradas com o uso de gravadores de ultrassom. Este método possui muitas vantagens, pois não é invasivo para os morcegos, possui uma equilibrada relação de custo-benefício e há possibilidade de fazer gravações de longas durações (Kunz; Brock, 1975; Pereira *et al.*, 2022), principalmente após o surgimento de dispositivos mais acessíveis e mais baratos (Hill *et al.*, 2018; López-Baucells *et al.*, 2019). Até então, o alto custo dos equipamentos de gravação, a falta de bibliotecas de chamados de ecolocalização de alta qualidade e a grande diversidade acústica desconhecida dos morcegos tropicais retardaram os estudos na região neotropical, comparado com a região temperada.

4.3 Bioacoustics

Bioacoustics is defined as the study of the emission, propagation and reception of sounds by animals (Sueur *et al.*, 2014; Towsey *et al.*, 2014) and is an interdisciplinary field of study linked to ethology, physiology, evolution and other fields of biology (Adams; Pedersen, 2013; Fenton *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2014). These sounds or acoustic signals are used by various animals in different situations, forms and contexts (Pereira *et al.*, 2022), such as territorial defense, attraction of a sexual partner, and group interactions, among other situations (Ahlén; Baag, 1999; Fenton *et al.*, 1987).

Because bats use echolocation to forage and navigate their environments, they need to emit ultrasonic calls continuously when active in flight (Fenton, 2013). This constant production of sounds allows researchers to use these acoustic data to record bat occurrences and, for some groups, even identify which species are present at that time and place (Jones, 1999). Bats present great acoustic diversity, ranging in frequency from 8 to 200 kHz (Altringham, 2011), and is expressed at two levels: (a) interspecific variation, represented by structural differences in calls between bat species (Figure 7), and (b) intraspecific variation, represented by differences within a species among different spatial and temporal contexts (Jones; Holderied, 2007; Russo *et al.*, 2018).

These variations in echolocation calls can be recorded using ultrasound recorders. This method has many advantages, as it is non-invasive for bats, has a balanced cost-benefit ratio, and allows for long-term recordings (Kunz; Brock, 1975; Pereira *et al.*, 2022), especially after the emergence of more accessible and cheaper devices (Hill *et al.*, 2018; López-Baucells *et al.*, 2019). Until now, the high cost of recording equipment, the lack of high-quality echolocation call libraries, and the great unknown acoustic diversity of tropical bats have delayed studies in the Neotropics, compared to the temperate region. For example,

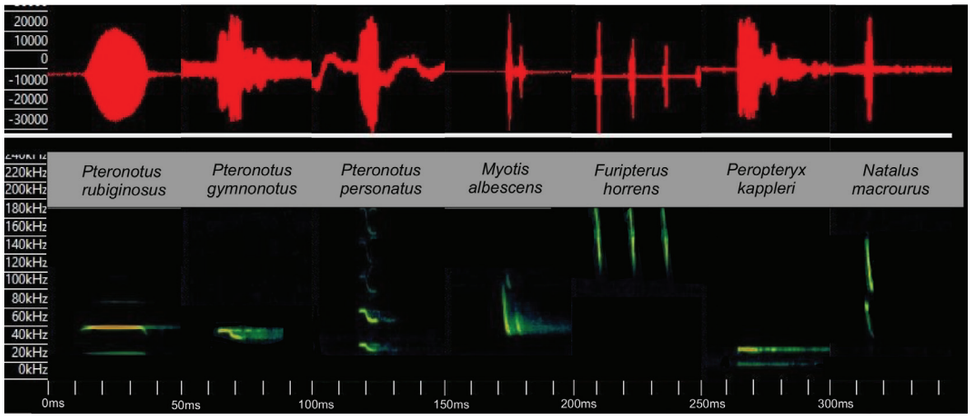


Figura 7: Variação interespecífica dos chamados de ecolocalização de algumas espécies de morcegos insetívoros aéreos encontradas nas cavernas ferríferas da Serra dos Carajás. Fonte: Fonoteca de Carajás (Trevelin *et al.*, 2025).
Figure 7: Interspecific variation in the echolocation calls of some aerial insectivorous bats species found in the ferriferous caves of Serra dos Carajás. Source: Acoustic library of Carajás (Trevelin *et al.*, 2025).

Por exemplo, o gravador de ultrassom autônomo AudioMoth possui baixo custo de aquisição (~ 99 dólares na cotação de 2025) comparado com os gravadores autônomos de ultrasssom mais baratos da Wildlife Acoustics (~749 dólares na cotação de 2025), é pequeno e pode ser facilmente configurado (Hill *et al*., 2018; Revilla-Martín *et al*., 2020). Com a disponibilização desse gravador, foram iniciados estudos sobre os morcegos insetívoros aéreos em locais tropicais que até então não tinham sido amostrados (Carvalho *et al.*, 2023; López-Bosch *et al.*, 2021; Meramo *et al.*, 2022) e começaram a ser utilizados em trabalhos de consultoria ambiental no Brasil. Além disso, em algumas áreas das regiões tropicais há um constante desenvolvimento de bases de dados acústicos de alta qualidade (ex. López-Baucells *et al*., 2016; Zamora-Gutierrez *et al*., 2020). A junção desses fatores permite que a técnica acústica seja cada vez mais utilizada em estudos nas regiões tropicais e há uma tendência de utilizar o monitoramento acústico em cavernas também nestas regiões (Kloepper *et al*., 2016).

O monitoramento acústico pode ser feito de duas maneiras: ativo ou passivo. O monitoramento ativo exige controle manual e ajuste de orientação do gravador. As vantagens deste método consistem em maximizar a qualidade da gravação e possibilitar a observação e gravação dos morcegos ao mesmo tempo, tornando-se um método ideal para monitoramentos de comportamentos dos morcegos. Já o monitoramento acústico passivo (PAM) é uma técnica onde gravadores autônomos são instalados para gravar continuamente o chamado de ecolocalização ultrassônica de morcegos durante um determinado período e não envolve supervisão (Froidevaux *et al*., 2014; Skalak *et al*., 2012). Esse método, que requer menos esforço pessoal no local, coleta dados de longo prazo, e a sua presença não influencia no

the AudioMoth autonomous ultrasound recorder has a low acquisition cost (~$99 at 2025 exchange rate) compared to the cheapest Wildlife Acoustics autonomous recorders (~$749 at 2025 exchange rate), is small, and can be easily configured (Hill *et al.*, 2018; Revilla-Martín *et al.*, 2020). The availability of this recorder facilitated the initiation of studies on aerial insectivorous bats in tropical locations that had not been sampled previously (Carvalho *et al.*, 2023; López-Bosch *et al.*, 2021; Meramo *et al.*, 2022) and it began to be used in environmental consulting work in Brazil. Furthermore, there is constant development of high-quality acoustic databases in some areas of the tropics (e.g. López-Baucells *et al*., 2016; Zamora-Gutierrez *et al*., 2020). The combination of these factors allows the acoustic technique to be increasingly used in studies in tropical regions, including a tendency for use in acoustic monitoring in caves in these regions (Kloepper *et al.*, 2016).

Acoustic monitoring can be done in two ways: active or passive. Active monitoring requires manual control and orientation adjustment of the recorder. The advantages of this method are that it maximizes recording quality and allows the observation and recording of bats at the same time, making it an ideal method for monitoring bat behavior. Passive acoustic monitoring (PAM) is a technique by which autonomous recorders are installed to continuously record the ultrasonic echolocation calls of bats over a certain period of time and does not involve supervision (Froidevaux *et al*., 2014; Skalak *et al*., 2012). This method, which requires less personnel effort on site, collects long-term data, and its presence does not influence bat behavior

comportamento de morcegos (Gibb *et al*., 2019; Revilla-Martín *et al*., 2020). Ambos os métodos possuem alta probabilidade de detectar espécies raras e que são dificilmente capturadas em métodos tradicionais (ex. rede-de-neblina, puçá e armadilhas de harpa), como os morcegos insetívoros aéreos (Appel *et al.*, 2021; Murray *et al.*, 1999). Devido a essas vantagens, o PAM está sendo utilizado para monitoramento de morcegos em ambientes subterrâneos, tanto para avaliar medidas de diversidade das espécies, padrões de atividade, como mensurar a abundância de indivíduos (Barré *et al.*, 2018; Frick *et al*., 2020; Matthäus *et al.*, 2022; Revilla-Martin *et al.*, 2020).

No entanto, é importante destacar que o uso do PAM encontra desafios, como a falta de um padrão acústico de alguns grupos de morcegos que dificulta a identificação precisa das espécies, principalmente morcegos filostomídeos (Figura 8) (família com maior número de espécies com ocorrência em cavernas) (Hintze *et al*., 2016). Outras limitações do uso da técnica estão relacionadas ao grande volume de dados (e.g. apenas uma noite de gravação contínua pode resultar em 60 GB), dificultando e exigindo mais tempo para a identificação manual dos sonotipos, (López-Baucells *et al.*, 2021; Perea *et al.*, 2020; Walters *et al.*, 2013).

Por fim, a bioacústica possui um potencial de contribuição no avanço de estudos sobre a quiropterofauna cavernícola e seu uso deve ser estimulado, implementado e aprimorado com cautela (Pereira *et al.*, 2022), especialmente na escolha dos gravadores e microfones e na análise dos dados (Appel *et al.*, 2024; Hintze *et al.*, 2016; López-Baucells *et al.*, 2021). Vale mencionar ainda que para haver precisão na identificação acústica das espécies

(Gibb *et al.*, 2019; Revilla-Martín *et al.*, 2020). Both methods have a high probability of detecting rare species that are difficult to capture using traditional methods (e.g., mist nets, hand nets and harp traps), such as aerial insectivorous bats (Appel *et al.*, 2021; Murray *et al.*, 1999). Due to these advantages, PAM is being used to monitor bats in subterranean environments, both to assess species diversity measures and activity patterns, and to measure the abundance of individuals (Barré *et al.*, 2018; Frick *et al.*, 2020; Matthäus *et al.*, 2022; Revilla-Martin *et al.*, 2020).

However, it is important to highlight that the use of PAM encounters challenges, such as the lack of an acoustic pattern for some groups of bats, which makes it difficult to accurately identify species, especially phyllostomid bats (the family with the largest number of species occurring in caves; Figure 8) (Hintze *et al.*, 2016). Other limitations of using PAM are related to the large volume of data (e.g., just one night of continuous recording can result in 60 GB) making it difficult and time-consuming to identify sonotypes manually (López-Baucells *et al.*, 2021; Perea *et al.*, 2020; Walters *et al.*, 2013)).

Finally, bioacoustics has the potential to advance studies on cave chiropterofauna and its use should be encouraged, implemented and improved with caution (Pereira *et al.*, 2022), especially regarding the choice of recorders and microphones and in data analysis (Appel *et al.*, 2024; Hintze *et al.*, 2016; López-Baucells *et al.*, 2021). It is also worth mentioning that accurate acoustic identification of bat species requires the capture

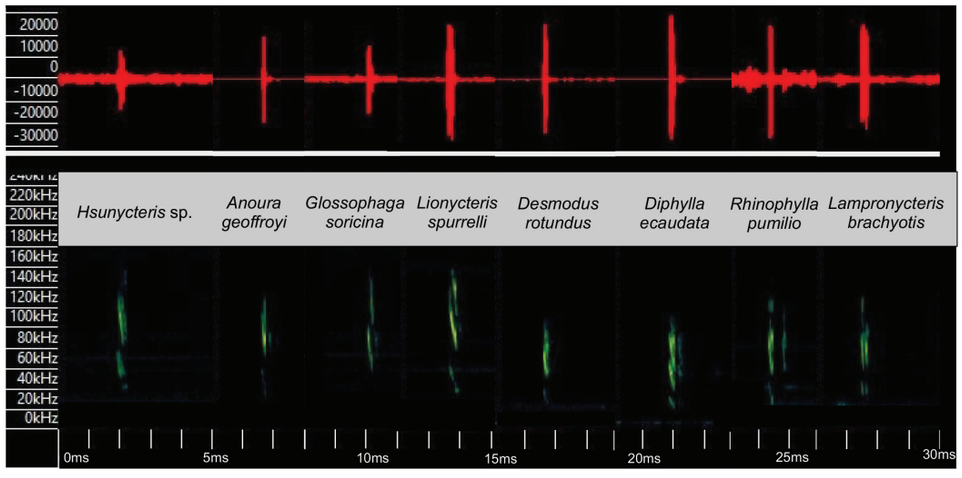


Figura 8: Chamados de ecolocalização de espécies pertencentes à família Phyllostomidae que podem ocorrer em cavernas ferríferas da Serra dos Carajás. Vale notar a alta similaridade dos chamados entre as espécies. Fonte: Fonoteca de Carajás (Trevelin *et al.*, 2025).

Figure 8: Echolocation calls of species of the family Phyllostomidae that may occur in the ferriferous caves of Serra dos Carajás. Note the high similarity of the calls among the species . Source: Acoustic library of Carajás (Trevelin *et al.*, 2025).

de morcegos, é altamente necessário realizar capturas dos indivíduos nas cavernas estudadas e construir uma biblioteca acústica das espécies (se não houver essa biblioteca estabelecida no local).Para auxiliar os consultores que trabalham nas cavernas da Serra dos Carajás, foi construída uma biblioteca acústica local chamada FoCar (Fonoteca de Carajás) que conta com 57 gravações de 18 espécies de morcegos (Trevelin *et al.*, 2025). Além disso, são requeridas visitas ocasionais nas cavernas para visualizar se suas características físicas, presença de água e vegetação ao redor foram modificadas com o tempo. Essas características podem afetar a qualidade de detecção dos microfones (Revilla-Martín *et al.*, 2020; Tejedor *et al.*, 2005). Nesse sentido, a bioacústica atualmente deve ser implementada de forma gradual e complementar a outras metodologias (Appel

of individuals in the studied caves and the construction of an acoustic library of the species (if such a library does not already exist on site). To assist consultants working in the caves of the Serra dos Carajás, a local acoustic library called FoCar (Fonoteca de Carajás) was built, which has 57 recordings of 18 species of bats (Trevelin *et al.*, 2025). In addition, occasional visits to the studied caves are required to see whether their physical characteristics, the presence of water and the surrounding vegetation, have changed over time. These characteristics can affect the detection quality of microphones (Revilla-Martín *et al.*, 2020; Tejedor *et al.*, 2005). In this sense, bioacoustics should currently be implemented gradually and along with other methodologies (Appel *et al.*, 2022; Pereira *et al.* 2022). In addition, a plan should



Figura 9: Gravadores de ultrassom autônomos: *Audiomoth* (à esquerda) e SM4 – *Song Meter* (à direita). Fotos: Giulliana Appel.
Figure 9: Autonomous ultrasound recorders: *Audiomoth* (left) and SM4 – *Song Meter* (right). Photos: Giulliana Appel.

et al., 2022; Pereira *et al*. 2022). Além disso, sua implementação deve ser planejada a fim de registrar as espécies que estão se abrigando na caverna monitorada e não espécies que estão forrageando perto da entrada. A partir da experiência adquirida com experimentos recentes de monitoramentos acústicos feitos nas cavernas da Serra dos Carajás, recomenda-se que os gravadores de ultrassom sejam instalados no interior da caverna a pelo menos 1 metro da entrada com o microfone perpendicular a saída dos morcegos (Figura 9). Adicionalmente, sugere-se a instalação de um gravador autonômo em cada entrada em cavernas com múltiplas entradas a fim de amostrar a composição total de espécies da caverna (Appel *et al*., 2025 em revisão).

4.4 Monitoramento com câmeras termais

Nos últimos anos novas metodologias para monitoramento de morcegos têm sido propostas, como a varredura 3D a laser (Azmy *et al*., 2012), imagens térmicas e algoritmos de visão computacional (Hristov *et al*., 2008; Rodrigues *et al*., 2016) que facilitaram ainda mais a contagem de colônias tornando-as mais precisas.

O sistema 3D é baseado no *scanner* a laser terrestre de detecção e alcance de luz (LiDAR), que pode, por exemplo, identificar e determinar remotamente a população de morcegos empoleirados em cavernas, além de permitir possibilidades de pesquisas sobre o comportamento de pernoite desses morcegos (Azmy *et al*., 2012). Já as imagens térmicas e algoritmos de visão computacional são técnicas não invasivas que podem ajudar no rastreamento de múltiplos alvos em um ambiente não controlado para contabilizar a população de colônias de morcegos (Rodrigues *et al*., 2016). As câmeras térmicas podem ser instaladas na entrada das cavidades naturais subterrâneas e realizar a contagem dos indivíduos saindo de abrigos para forragear, fornecendo informações precisas sobre a densidade populacional (Otálora-Ardila *et al*., 2019; Pimentel *et al*., 2022).

Atualmente há trabalhos experimentais com o uso de veículos aéreos não tripulados ou drones, sendo desenvolvidos para quantificar taxas de movimento de animais (Koger *et al*., 2023), ou para gravar dados bioacústicos e termais de morcegos (Fu *et al*., 2018). Porém, esses trabalhos ainda não foram adaptados para cavernas, mas talvez seja questão de tempo. Por fim, embora altamente promissores, esses métodos ainda não estão totalmente desenvolvidos e muitas vezes são demasiadamente caros.

be made for its implementation in order to record the species sheltering in the monitored cave, rather than those foraging near the entrance. Based on the experience gained from recent acoustic monitoring experiments carried out in the caves of the Serra dos Carajás, it is recommended that ultrasound recorders be installed inside the cave at least 1 meter from the entrance with the microphone perpendicular to the bats' exit (Figure 9). Additionally, an autonomous recorder should be installed at each entrance of caves with multiple entrances to sample the total species composition of the cave (Appel *et al*., 2025, under review)

4.4 Thermal camera monitoring

New methodologies for bat monitoring have been proposed in recent years, such as 3D laser scanning (Azmy *et al*., 2012), thermal imagery and computer vision algorithms (Hristov *et al*., 2008; Rodrigues *et al*., 2016), which have further facilitated colony counting and its accuracy.

The 3D system is based on the terrestrial laser scanner for light detection and ranging (LiDAR), which can, for example, remotely identify and determine the population abundance of bats roosting in caves, in addition to allowing research possibilities on their roosting behavior (Azmy *et al*., 2012). Thermal imaging and computer vision algorithms are non-invasive techniques that can help track multiple targets in an uncontrolled environment and can be used to determine the population size of bat colonies (Rodrigues *et al*., 2016). Thermal cameras can be installed at the entrance of caves and used to count individuals leaving shelters to forage, thereby providing accurate information on population density (Otálora-Ardila *et al*., 2019; Pimentel *et al*., 2022).

Currently, there are experimental studies using unmanned aerial vehicles or drones to quantify animal movement rates (Koger *et al*., 2023), or to record bioacoustic and thermal data from bats (Fu *et al*., 2018). Although these studies have not yet been adapted to caves, it may only be a matter of time. Still, these methods are not yet fully developed and are often very expensive.



Figura 10: A) Posicionamento e calibragem da câmera termográfica; B) Captura da tela do registro, onde as temperaturas mais altas são representadas pela coloração branca na imagem e correspondem aos morcegos; C) câmera termográfica posicionada na entrada da caverna. Fotos: A e B: Acervo Vale. C: Giulliana Appel.

Figure 10: A) Positioning and calibration of a thermographic camera; B) Screen capture of a recording, with the highest temperatures represented by the white color in the image corresponding to bats ; C) Thermal imaging camera placed at the cave entrance. Photos: A and B: Vale Collection. C: Giulliana Appel.

Tabela 1: Síntese dos principais métodos de amostragem de morcegos que podem ser utilizados em programas de monitoramento em cavernas ferríferas.

Método	Parâmetros levantados	Pontos positivos	Pontos negativos
Coleta manual com auxílio de pinções	Riqueza, diversidade, abundância.	Método simples e transporte fácil.	Pode demandar mais tempo na sua aplicação e requer bastante habilidade de manuseio. Alto potencial de causar lesão nos morcegos.
Coleta manual com auxílio de puçá (*hand-nets*)	Riqueza, diversidade, abundância.	Permite capturar vários indivíduos ao mesmo tempo. São dobráveis e ajustáveis, facilitando o transporte.	Demanda habilidade e destreza para o manuseio efetivo. Método susceptível a lesão nos indivíduos, o que demanda agilidade para retirada dos morcegos de dentro do saco.
Redes de neblina	Riqueza, diversidade, abundância.	São muito eficazes na captura de morcegos. Permite capturar vários indivíduos ao mesmo tempo. São leves e de fácil transporte.	Requer supervisão contínua. Maior estresse para os morcegos durante a contenção e remoção. Uso não indicado diante da presença de colônia numerosa. Indicado utilizar esse método em associação com outro, pois o tamanho da malha e disposição da rede pode ser seletivo quanto à captura de espécies.
Armadilha de harpa (*Harp trap*)	Riqueza, diversidade, abundância.	Não causa injúrias aos morcegos. Remoção fácil e rápida dos indivíduos capturados. Após sua montagem, seu posicionamento é rápido e fácil.	Sua montagem exige habilidade no manuseio para o correto tensionamento das linhas verticais. Dificuldades na logística devido ao peso. Área de captura relativamente pequena. Pode ser seletiva para espécies que vocalizam em altas frequências. Exige tempo considerável para instalação em cavernas com mais de uma entrada ou cavernas com entradas muito grandes devido ao fechamento com sombrites.
Marcação e recaptura	Padrão de movimentação e uso de habitat, deslocamento, fidelidade ao abrigo, estimativa de idade, período reprodutivo, tamanho populacional.	Baixo custo. Pode ser amplamente aplicado, aumentando as chances de recaptura.	Não há padronização nem centralização dos dados para permitir melhor retorno da aplicação do método. Mais eficiente quando aplicados em monitoramentos de longo prazo. O uso do tipo de marcação inadequado pode ocasionar ferimentos incapacitantes aos morcegos.
Telemetria	Padrão de movimentação, uso e preferência de habitat, deslocamento, fidelidade ao abrigo.	Resposta em curto prazo	Alto custo. Limitações quanto às características geomorfológicas da área de estudo. Limitação técnica dos transmissores (peso, vida útil).
Bioacústica (Monitoramento acústico passivo)	Riqueza, diversidade, comportamento, uso do abrigo, padrões de atividade horária de saída e entrada das cavernas.	Método não invasivo e autônomo. Possibilidade de amostragens a longo prazo. Disponibilidade de equipamentos de valores e tamanhos variados. Possibilidade de amostrar espécies difíceis de serem detectadas por outros métodos.	Poucas bibliotecas acústicas disponíveis para morcegos cavernícolas. Falta de padrão acústico de algumas espécies, dificultando a identificação (especialmente Phyllostomidae). A escolha do equipamento e microfone podem selecionar as espécies (ex. espécies que vocalizam em frequências muito altas), trazendo viés à amostragem. Geração de grande volume de dados. Ineficiência dos softwares para identificação automática. Falta de profissionais experientes para identificação das espécies.
Câmeras termais	Estimativa populacional, comportamento, uso do abrigo, dinâmica populacional, padrões de atividade horária de saída e entrada as cavidades.	Não invasivo. Disponibilidade de equipamentos de valores e tamanhos variados.	Equipamentos com maior acurácia são mais caros. Baixa autonomia das baterias. Baixa precisão na identificação das espécies. Cavernas com entradas grandes ou múltiplas entradas necessitam de mais de uma câmera termal para abranger a saída completa dos indivíduos.

Table 1: Summary of the main bat sampling methods that can be used in monitoring programs in ferriferous caves.

Method	Parameters raised	Positive points	Negative points
Manual collection with the aid of tweezers/forceps	Richness, diversity, abundance.	Simple method and easy transportation.	It may take longer to apply and requires a lot of handling skill. High potential for causing injury to bats.
Manual collection with the aid of hand-nets	Richness, diversity, abundance.	Allows the capture of several individuals at the same time. They are foldable and adjustable, making them easy to transport.	It requires skill and dexterity for effective handling. The method makes individuals susceptible to injury, and agility is required to remove the bats from the bag.
Mist nets	Richness, diversity, abundance.	Very effective at capturing bats. Allows the capture of several individuals at the same time. They are light and easy to transport.	Requires continuous supervision. Increased stress for bats during containment and removal. Use not recommended in the presence of a large colony. It is recommended to use this method in conjunction with another, as the size of the mesh and arrangement of the net can be selective in terms of the species captured.
Harp trap	Richness, diversity, abundance.	Does not cause injuries to bats. Easy and quick removal of captured individuals. After assembly, positioning is quick and easy.	Its assembly requires skill in handling to correctly tension the vertical lines. Difficulties in logistics due to weight. Relatively small capture area. May be selective for species that vocalize at high frequencies. Due to the need for closure with shade cloth, it takes considerable time to install in caves with more than one entrance or very large entrances.
Mark and recapture	Movement and habitat use patterns, displacement, roost fidelity, age estimation, reproductive period, population size.	Low cost. Can be widely applied, increasing the chances of recapture.	There is no standardization or centralization of data to allow for better returns on the application of the method. More efficient when applied in long-term monitoring. The use of the wrong type of marking can cause disabling injuries to bats.
Telemetry	Movement pattern, habitat use and preference, displacement, shelter fidelity.	Short term response.	High cost. Limitations regarding the geomorphological characteristics of the study area. Technical limitations of the transmitters (weight, useful life).
Bioacoustics (Passive acoustic monitoring)	Richness, diversity, behavior, shelter use, population hourly activity patterns of entry and exit from the cave.	Non-invasive and autonomous method. Possibility of long-term sampling. Availability of equipment of varying values and sizes. Possibility of sampling species difficult to detect by other methods.	Few acoustic libraries available for cave bats. Lack of acoustic pattern for some species, making identification difficult (especially Phyllostomidae). The choice of equipment and microphone can can selective of species (e.g. species that vocalize at very high frequencies), biasing sampling. Generation of large volumes of data. Inefficiency of software for automatic identification. Lack of experienced professionals to identify species.
Thermal cameras	Population estimation, behavior, shelter use, population dynamics, hourly activity patterns of entry and exit from the cave.	Non-invasive. Availability of equipment of varying values and sizes.	Equipment with greater accuracy is more expensive. Low battery life. Low accuracy in species identification. Caves with large or multiple entrances require more than one thermal camera to fully capture individuals exiting.

5 SÍNTESE DOS MÉTODOS DE CAPTURA E MONITORAMENTO E PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES

Ao longo do capítulo apresentamos diversos métodos, as aplicações, vantagens e desvantagens de seus usos. Nenhum método é 100% eficiente e sem limitações. Dessa forma, sempre que possível, é aconselhável utilizar mais de um método em conjunto, a fim de aumentar as possibilidades de amostragem e o esforço de captura e registro de espécies raras ou difíceis de serem capturadas com métodos convencionais (Tuttle, 1976). Em cavernas com poucos indivíduos ou pequenos grupos, o uso da busca ativa com o auxílio de puçás no interior do abrigo pode se apresentar eficiente, assim como o método de espera com redes de neblina instaladas nas entradas das cavidades para interceptar os indivíduos na saída do abrigo. A instalação de redes nos condutos de cavernas com grandes congregações de morcegos pode capturar, em poucos minutos, dezenas ou até centenas de indivíduos, o que torna inviável as remoções dos morcegos, mesmo para equipes grandes e capacitadas para executar a atividade. Nesse caso, este método não é recomendado, pois pode causar um expressivo impacto sobre as populações. Recomenda-se o uso de harpas em locais onde haja um estreitamento ou entradas, direcionando o fluxo de saída dos morcegos no sentido da armadilha. Para cavernas com concentrações de morcegos insetívoros aéreos, o monitoramento acústico pode ser uma alternativa viável já que possibilita o inventário dessas espécies sem causar estresse na captura, além de registrar eficientemente espécies de alta frequência (*F. horrens* e *N. macrourus*).

Uma abordagem eficaz de monitoramento de morcegos em cavidades envolve a integração e análise de dados provenientes de diferentes métodos. A combinação de informações obtidas por meio da integração dos métodos permite uma compreensão mais ampla da ecologia e do comportamento das populações de morcegos em seu ambiente natural.

Esses métodos podem ser adaptados e combinados de acordo com as características específicas do local de estudo e os objetivos do monitoramento, contribuindo para uma avaliação mais precisa e abrangente das populações de morcegos em cavidades. A seguir, será apresentada uma síntese dos principais métodos de amostragem de morcegos que podem ser utilizados em programas de monitoramento em cavernas ferríferas.

5 SUMMARY OF CAPTURE AND MONITORING METHODS AND MAIN RECOMMENDATIONS

Throughout this chapter, we have presented several methods, their applications, advantages, and disadvantages. No method is 100% efficient and without constraints. Therefore, whenever possible, we advise the use of more than one method together to increase sampling possibilities and capture efforts and record rare species or those that are difficult to capture using conventional methods (Tuttle, 1976). For caves with few individuals or small groups, active searches with the aid of nets inside the shelter may be efficient, as may be the passive method with mist nets installed near the entrance(s) of the cave to intercept individuals as they leave the shelter. The use of nets in cave conduits with large congregations of bats may capture dozens or even hundreds of individuals in a few minutes, which makes it impossible to remove the bats, even for large and well-trained teams to carry out this activity. Thus, this method is not recommended for such cases, as it may significantly impact populations. Harp traps are recommended for places where there is a narrowing or entrances, directing the outflow of bats towards the trap. For caves with large concentrations of insectivorous bats, acoustic monitoring is a viable alternative as it enables these species to be recorded without causing stress during capture and efficiently records high-frequency species such as *F. horrens* and *N. macrourus*.

An effective approach to monitoring bats in caves involves integrating and analyzing data from different methods. Combining information obtained through the integration of methods allows for a more comprehensive understanding of the ecology and behavior of bat populations in their natural environment.

These methods can be adapted and combined according to the specific characteristics of the study site and the monitoring objectives, thereby contributing to a more accurate and comprehensive assessment of bat populations in caves. Below, we present a summary of the main bat sampling methods that can be used in monitoring programs in ferriferous caves.

6 SAÚDE E SEGURANÇA NO TRABALHO COM MORCEGOS EM CAVERNAS

O trabalho com morcegos pode envolver visitas a locais potencialmente perigosos, tornando-se importante conhecer as medidas de segurança adequadas para o desenvolvimento do trabalho. É importante que todos os envolvidos no trabalho conheçam os riscos e que estes sejam devidamente identificados, avaliados e controlados de acordo com o plano de segurança. Isto é um procedimento importante do planejamento, pois garante que os pesquisadores envolvidos operem de forma consciente dos riscos. Dessa forma, os procedimentos de segurança precisam ser revistos regularmente e discutidos em conjunto, principalmente após qualquer incidente.

O planejamento deve começar com a conscientização sobre as vacinas necessárias para executar o trabalho, pois qualquer pessoa que trabalhe com animais e/ou em áreas de risco, deve garantir que a sua imunização antitetânica e antirrábica (pré-exposição) esteja em dia. Além disso, é sempre aconselhável tomar precauções adequadas de higiene ao visitar as cavidades. Sempre cubra quaisquer cortes abertos antes de entrar na caverna, lave as mãos após manusear os morcegos ou seus excrementos e antes de comer ou beber.

Ao acessar uma cavidade, é essencial o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI). Macacões são recomendados porque protegem as roupas da sujeira e o corpo de irritações e/ou perfurações, bem como do contato com agentes biológicos indesejáveis. Devem ser usadas botas com certificado de autenticação e luvas resistentes (luvas de raspa, vaqueta e nitrílica, a depender da atividade a ser desempenhada) para proteger contra qualquer tipo de perfurações, e para manusear os morcegos. O uso de máscaras é uma medida recomendada dentro de cavernas para proteger a saúde dos visitantes, reduzir o risco de transmissão de doenças zoonóticas (por exemplo, Histoplasmose), minimizar a exposição a alérgenos e partículas em suspensão, e garantir o cumprimento das regulamentações de segurança e conservação, minimizando o impacto humano sobre os morcegos e seu habitat. Os capacetes fornecem proteção considerável contra queda de objetos ou projeção pontiagudas.

Qualquer visita às cavidades requer boa iluminação. Uma lanterna frontal é preferível porque deixa o visitante com as duas mãos livres e fornece luz na direção que ele está olhando. Sempre carregue uma lanterna sobressalente como garantia,

6 HEALTH AND SAFETY WHEN WORKING WITH BATS IN CAVES

Working with bats may involve visiting potentially dangerous locations, making it important to be aware of the appropriate safety measures for carrying out the work. It is important that everyone involved in the work is aware of the risks and that these are properly identified, assessed and controlled in accordance with a safety plan. This is an important planning procedure, as it ensures that the researchers involved operate in a risk-aware manner. Therefore, safety procedures need to be reviewed regularly and discussed together, especially after any incident.

Planning should begin with awareness of the vaccinations required to perform the work, as anyone working with animals and/or in high-risk areas should ensure that their tetanus and rabies immunizations (pre-exposure) are up to date. In addition, it is always advisable to take appropriate hygiene precautions when visiting caves. Always cover any open cuts before entering a cave and wash your hands after handling bats or their droppings, and before eating or drinking.

The use of Personal Protective Equipment (PPE) is essential when accessing a cave. Coveralls are recommended because they protect clothing from dirt and the body from irritation and/or punctures, as well as from contact with undesirable biological agents. Boots with an authentication certificate and resistant gloves (scratch, cowhide and nitrile gloves, depending on the activity to be performed) should be worn to protect against any type of punctures, and to handle bats. The use of masks is a recommended measure inside caves to protect the health of visitors, reduce the risk of transmission of zoonotic diseases (e.g., Histoplasmosis), minimize exposure to allergens and suspended particles, ensure compliance with safety and conservation regulations, and minimize human impact on bats and their habitat. Helmets provide considerable protection against falling or projecting sharp objects.

Any cave visit requires good lighting. A headlamp is preferable because it frees both hands and provides light in the direction the visitor is looking. A spare flashlight should always be carried



Figura 11: A) Utilização de EPI durante a incursão em cavernas; B) Utilização de EPI durante manuseio de morcego. Fotos: A: Ativo Ambiental; B: Giulliana Appel.
Figure 11:. A) Use of PPE during cave exploration; B) Use of PPE during bat handling. Photos: A: Ativo Ambiental; B: Giulliana Appel.

caso a lanterna principal apresente algum problema.

Os trabalhos de monitoramento em cavernas requerem uma atenção especial à segurança, devido às condições desafiadoras, incluindo quedas, fraturas e contusões. Os pesquisadores inexperientes devem procurar aconselhamento e orientação prática de um espeleólogo experiente, que deverá possuir o equipamento adequado e estar familiarizado com as boas práticas de espeleologia.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mostramos aqui metodologias e boas práticas para aplicação no monitoramento de morcegos em cavernas de formação ferrífera, mas que certamente também são aplicáveis a cavernas em outras litologias. Destacamos ainda a importância de planejar as ações do monitoramento, principalmente para monitoramentos a longo prazo. Assim, é imprescindível seguir os mesmos protocolos amostrais para garantir a comparação entre os períodos analisados para que o mesmo método seja replicável e as análises robustas. Ademais, essas diretrizes devem passar constantemente por revisões e, quando necessário, serem atualizadas observando o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias que aprimorem o monitoramento.

as a backup in case the main flashlight malfunctions.

Cave monitoring work requires special attention to safety due to the challenging conditions, including the possibility of falls, fractures and bruises. Inexperienced researchers should seek advice and practical guidance from an experienced caver, who should have the appropriate equipment and be familiar with good caving practices.

7 FINAL CONSIDERATIONS

Here we present methodologies and best practices for monitoring bats in caves in ferriferous formations, which are certainly also applicable to caves in other lithologies. We also highlight the importance of planning monitoring actions, especially for long-term monitoring. Thus, it is important to follow the same sampling protocols to ensure comparisons between the analyzed periods so that the same method is replicable and the analyses powerful. Furthermore, these guidelines should be constantly reviewed and, when necessary, updated to take into account the development of new techniques and technologies that improve monitoring.

Por fim, queremos chamar a atenção para quatro pontos importantes quando da realização de monitoramentos de morcegos em cavernas em geral:

1 Organização da documentação pertinente (autorização vacinação e sorologia antirrábica conforme determinação das instituições de saúde, fichas de anotação, mapa da cavidade, chaves taxonômicas para auxiliar na identificação das espécies);
2 Organização do material de coleta e marcação (organização de redes de neblina de vários tamanhos; organização da *harp trap*, lona para direcionamento do fluxo de saída dos morcegos quando necessário; organização de anilhas de vários tamanhos e/ou colares, alicate para abrir, colocar, tirar ou trocar as anilhas, luvas de coleta), e outros materiais, de acordo com a metodologia a ser empregada: telemetria, bioacústica, câmeras termais e outros, e é importante sempre conhecer o equipamento que irá manusear;
3 Organização do material para manuseio dos espécimes (paquímetro, dinamômetro de tamanhos diferentes, luvas para manusear, luvas de procedimento (látex ou nitrila) e uso de máscaras. Vale destacar aqui a importância de vacinação da equipe técnica contra raiva e acompanhamento sorológico e vacinação contra COVID, bem como seguir as recomendações para a redução dos riscos de transmissão do SARS-CoV-2 de humanos para morcegos, elaboradas pela Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (2020).
4 Higienizar todo o material logo após a utilização, como redes de neblina ou outro tipo de armadilha, sacos de contenção, luvas e máscaras, entre outros materiais.

8 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Vale e aos organizadores pela oportunidade de participar dessa importante obra que certamente contribuirá para o desenvolvimento de estudos efetivos de monitoramento da fauna subterrânea.

Finally, we would like to draw attention to four important points when monitoring bats in caves in general:

1 Organization of relevant documentation (rabies vaccination and serology as determined by health agencies, annotation sheets, cave map, taxonomic keys to assist in species identification);
2 Organization of collection and marking material (organization of mist nets of various sizes; organization of harp trap, tarpaulin to direct the outflow of bats when necessary; organization of rings of various sizes and/or collars, pliers to open, place, remove or change rings, collection gloves), and other materials, according to the methodology to be used (telemetry, bioacoustics, thermal cameras, etc.). It is important to always know the equipment that you will handle;
3 Organization of material for handling specimens [caliper, dynamometers of different sizes, gloves for handling, procedure gloves (latex or nitrile) and masks]. It is worth highlighting here the importance of vaccinating the technical team against rabies and serological monitoring and vaccination against COVID, as well as following the recommendations for reducing the risk of transmission of SARS-CoV-2 from humans to bats prepared by the Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (2020).
4 Sanitize all materials immediately after use, such as mist nets or other types of traps, containment bags, gloves and masks, among other materials.

8 ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Vale and the organizers for the opportunity to participate in this important work that will certainly contribute to the development of effective studies for monitoring subterranean fauna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ADAMS, R. A.; PEDERSEN, S. C. (ed.). **Bat evolution, ecology, and conservation**. New York: Springer Science, 2013.

AGUIAR, L. M. S.; BERNARD, E.; MACHADO, R. B. Habitat use and movements of *Glossophaga soricina* and *Lonchophylla dekeyseri* (Chiroptera: Phyllostomidae) in a Neotropical savannah. **Zoologia (Curitiba)**, v. 31, n. 3, p. 223–229, 2014.

AHLÉN, I.; BAAGOE, H. J. Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe—experiences from field identification, surveys and monitoring. **Acta Chiropterologica**, v. 1, n. 2, p. 137–150, 1999.

ALDRIDGE, H. D. J. N.; BRIGHAM, R. M. Load carrying and manoeuvrability in an insectivorous bat: a test of the 5% rule of radio-telemetry. **Journal of Mammalogy**, v. 69, n. 2, p. 379- 382, 1988.

ALTRINGHAM, J. D. **Bats: from evolution to conservation**. 2nd ed. [*S. l.*]: Oxford University Press, 2011.

AMELON, S. K. *et al*. Radiotelemetry: techniques and analysis. *In*: KUNZ, T. H. (ed). **Ecological and behavioral methods for the study of bats**. Baltimore; Maryland: John Hopkins University Press, 2009. p. 57–77.

APPEL, G. *et al*. Habitat disturbance trumps moonlight effects on the activity of tropical insectivorous bats. **Animal Conservation**, v. 24, n. 6, p. 1046–1058, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/acv.12706. Acesso em: 28 ago. 2024.

APPEL, G. *et al*. The use of complementary methods to sample bats in the Amazon. **Acta Chiropterologica**, v. 23, n. 2, p. 499–511, 2022. DOI: 10.3161/15081109ACC2021.23.2.017

APPEL, G. *et al*. A cautionary approach on monitoring bats with extreme ultrasound frequency calls in Amazonian caves. **Acta Chiropterologica (*in review*)**, 2024. *In press*.

APPEL, G. *et al.* Using active and passive methods to monitor cave-dwelling bats in Amazonian caves. **Biodiversity and Conservation**, 2025. *In press*.

ARBUTHNOTT, D., BRIGHAM, R. M. The influence of a local temperature inversion on the foraging behaviour of big brown bats, *Eptesicus fuscus*. **Acta Chiropterologica**, v. 9, n. 1, p. 193–201, 2007. DOI: 10.3161/1733-5329(2007)9[193:TIOALT]2.0.CO;2

ARITA, H. T. The conservation of cave-roosting bats in Yucatan, Mexico. **Biological Conservation**, v. 76, n. 2, p. 177–185, 1996.

ARNONE, I.S. **Estudo da comunidade de morcegos na área cárstica do Alto Ribeira-SP**: uma comparação com 1980. 2008. 115 f. Dissertação (mestrado em ciências) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ATIVO AMBIENTAL LTDA. **Monitoramento de fauna e condições ambientais do subprograma de monitoramento espeleológico**: Programa de Gestão Espeleológica – Plano Básico Ambiental (PBA). Parauapebas: [VALE S.A.], 2024. 117 p. [RADA – Relatório Anual de Desempenho Ambiental – Projeto Ferro Carajás Serra Norte – N4 e N5 – VALE S.A.]. Relatório.

ÁVILA-FLORES, R.; MEDELLÍN, R. A. Ecological, taxonomic, and physiological correlates of cave use by Mexican bats. **Journal of Mammalogy**, v. 85, n. 4, p. 675– 687, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1644/BOS-127. Acesso em: 28 ago. 2024.

AZMY, S. N. *et al*. Counting in the dark: Non-intrusive laser scanning for population counting and identifying roosting bats. **Scientific Reports**, v. 2, n. 1, p. 524, 2012. DOI: 10.1038/srep00524

BANERJEE, A. *et al*. Bats and Coronaviruses. **Viruses**, v. 11, n. 1, p. 41, 2019. DOI: 10.3390/v11010041

BARBOUR, R. W.; DAVIS, W. H. **Bats of America**. Lexington: The University Press of Kentucky, 1969. 286. p.

BARCLAY, R. M. R.; BELL, G. P. Marking and observational techniques. *In:* KUNZ, T. H.; PARSONS, S. **Ecological and behavioral methods for the study of bats**. 2nd ed. Washington: Smithsonian Institution Press, 1988.

BARRÉ, K. *et al*. Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: implications for European siting guidance. **Biological Conservation**, v. 226, p. 205–214, 2018.

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, 2020. DOI: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. DOI: 10.3161/15081109ACC2021.23.1.020

BARROS, J. S.; BERNARD, E. Big family, warm home, and lots of friends: Pteronotus large colonies affect species richness and occupation inside caves. **Biotropica**, v. 55, n. 3, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1111/btp.13211

BARROS, M. A. S.; LUZ, J. L.; ESBÉRARD, C. L. Situação atual da marcação de morcegos no Brasil e perspectivas para a criação de um programa nacional de anilhamento. **Chiroptera Neotropical,** v.18, n.1, p. 1074–1088, 2012.

BELS, L. Fifteen years of bat-banding in The Netherlands. **Publ Natuur Genoot Limburg**, v. 5, p. 1–99, 1952.

BERNARD, E.; FENTON, M. B. Bat Mobility and Roosts in a Fragmented Landscape in Central Amazonia, Brazil. **Biotropica**, v. 35, n. 2, p. 262–277, 2003.

BERRY, N. *et al*. Detection and avoidance of harp traps by echolocating bats. **Acta Chiropterologica**, v. 6, n. 2, p. 335–346, 2004. DOI: https://doi.org/10.3161/001.006.0211.

BOBROWIEC, P. GRIBEL, R.. (2010). Effects of different secondary

vegetation types on bat community composition in Central Amazonia, Brazil. **Animal Conservation**. 13. 204 – 216. 10.1111/j.1469-1795.2009.00322.x.

BRANDT MEIO AMBIENTE LTDA. **Monitoramento biológico e climático do subprograma de monitoramento espeleológico – Programa de Gestão Espeleológica – Plano Básico Ambiental (PBA)**. Parauapebas: [VALE S. A.], 2023. 603 p. [RADA – Relatório Anual de Desempenho Ambiental – Complexo S11D – Elieser Batista – VALE S.A.]. Relatório.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Portaria MMA nº 148 de 7 de junho de 2022. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 jun. 2022. Seção 1, p. 74.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **2022 Anuário Estatístico**: do Patrimônio Espeleológico Brasileiro. Brasília: ICMBio, 2023. ano 5, n. 5. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleologico-brasileiro/. Acesso em: 31 ago 2024.

BREDT, A.; UIEDA, W.; MAGALHÃES, E. D. Morcegos cavernícolas da região do Distrito Federal, centro oeste do Brasil (Mammalia, Chiroptera). **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 16, n. 3, p. 731-770, 1999.

BRUNET-ROSSINI, A. K.; WILKINSON, G. S. Methods for age estimation and the study of senescence in bats. *In*: KUNZ, T.H.; PARSONS, S. (ed.). **Ecological and behavioral methods for the study of bats**. 2 nd. ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2009. p. 315-325.

CARVALHO, W. D. *et al*. Complementarity between mist-netting and low-cost acoustic recorders to sample bats in Amazonian rainforests and savannahs. **Community Ecology**, v. 24, n. 11, p. 1–14, 2023. DOI:10.1007/s42974-022-00131-5

CEBALLOS, G.; MEDELLIN, R. Diclidurus albus. **Mammalian Species**, v. 316, p. 1–4, 1988.

CONSELHO FEDERAL DE BIOLOGIA. Resolução nº 301, de 8 de dezembro de 2012. Dispõe sobre os procedimentos de captura, contenção, marcação, soltura e coleta de animais vertebrados *in situ e ex situ*, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 dez. 2012.

CONSELHO FEDERAL DE MEDICINA VETERINÁRIA. Resolução nº 1000, de 11 de maio de 2012. Dispõe sobre procedimentos e métodos de eutanásia em animais e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 maio 2012.

CONSTANTINE, D. G. An automatic bat-collecting device. **Journal of Wildlife Management**, v. 22, p. 17–22, 1958.

CONSTANTINE, D. G. Trampa portátil para vampiros usada en programas de campaña antirrábica. **Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana**, v. 67, p. 39–42, 1969.

CONSTANTINE, D. G.; VILLA, B. R. Métodos de lucha contra los vampiros transmisores de la rabia. **Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana**, v. 53, v. 1, p. 7–12, 1962.

DÍAZ, M. M. *et al*. **Clave de identificación de los murciélagos de Sudamérica**. Yerba Buena: Rubén Marcos Barquez, 2016. (Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina, nesp., n. 2).

DRESSLER, F. *et al*. From radio telemetry to ultra-low-power sensor networks: tracking bats in the wild. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 1, p. 129-135, 2016.

DUDA, N.; WEIGEL, R.; KOELPIN, A. Sensor Enhanced Dual Frequency RSSI Distance Estimation for Low Weight Wireless Sensor Nodes. **IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)**, Singapore, p. 1325-1327, 2019. DOI: 10.1109/APMC46564.2019.9038327

EGER, J.L. **Systematics of the genus Eumops (Chiroptera: Molossidae)**. Toronto: Royal Ontario Museum, 1977. 69 p. (Life Sciences Contributions, n.110).

ESBÉRARD, C. E. L. Diversidade de morcegos em uma área de Mata Atlântica regenerada no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Zoociências**, v. 5, n. 2, p. 189-204, 2003.

FENTON, M. B. Questions, ideas and tools: lessons from bat echolocation. **Animal Behaviour**, v. 85, n. 5, p. 869-879, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.02.024. Acesso em: 1 set. 2024.

FENTON, M. B.; FAURE, P. A.; RATCLIFFE, J. M. Evolution of high duty cycle echolocation in bats. **Journal of Experimental Biology**, v. 215, p. 2935–2944, 2012. DOI: 10.1242/jeb.073171

FENTON. M. B.; TENNANT, D. C.; WYSZECKI, J. Using echolocation calls to measure the distribution of bats: the case of *Euderma maculatum*. **Journal of Mammalogy**, v. 68, n. 1, p. 142–144, 1987. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1381059. Acesso em: 1 set. 2024.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste**, v. 17, n. 3, p. 106-115, 2005.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Trophic structure and natural history of bat guano invertebrate communities, with special reference to Brazilian caves. **Tropical Zoology**, v. 12, p. 231-252, 1999.

FERREIRA, R. L.; PROUS, X.; MARTINS, R. P. Structure of bat guano communities in a dry Brazilian cave. **Tropical Zoology**, v. 20, p. 55-74, 2007.

FERRELL, C. S.; WILSON, D. E. *Platyrrhinus helleri*. **Mammalian Species**, n. 373, p. 1–5, 1991.

FRICK, W. F.; KINGSTON, T.; FLANDERS, J. A review of the major threats and challenges to global bat conservation. **Annals of New York Academic Science**, v. 1469, n. 1, p. 5–25, 2020. DOI: 10.1111/nyas.14045

FROIDEVAUX, J. S. *et al*. Optimizing passive acoustic sampling of bats in forests. **Ecology and Evolution**, v. 4, n. 24, p. 4690–4700, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1111/nyas.14045. Acesso em: 1 set. 2024.

FU, Y.; KINNIRY, M.; KLOEPPER, L. N. The Chirocopter: a UAV for recording sound and video of bats at altitude. **Methods Ecol. Evol**., v. 9, p. 1531-1535, 2018. DOI: 10.1111/2041-210X.12992

FULLER, M. R.; FULLER, T. K. Radio-telemetry equipment and applications for carnivores. *In*: BOITANI, L.; POWELL, R. A.

Carnivore Ecology and Conservation: a handbook of techniques. [*S. l.*]: Oxford University Press, 2012. p. 152–168. DOI:10.1093/acprof:oso/9780199558520.003.0007

FUREY, N. M.; RACEY, P. A. Conservation ecology of cave bats. In: VOIGT, C. C.; KINGSTON, T. (ed.), **Bats in the Anthropocene**: conservation of bats in a changing world. Cham: Springer, 2016. p. 463–500. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9_15. Acesso em: 1 set. 2024.

GANNON, M.R. A new technique for marking bats. **Bat Res. News**, v. 34, p. 88–89, 1993.

GANNON, W. L.; SIKES, R. S. Guidelines of the American Society of Mammalogists for the use of wild mammals in research. **J. Mammal**, v. 88, n. 3, p. 809–823, 2007.

GARDNER, A. L. (ed.). Marsupials, Xenarthrans, Shrews, and Bats. *In*: VOSS, R. S. **Mammals of South America**. Chicago; London: The University of Chicago Press, 2007 [2008]. v. 1. DOI:10.7208/chicago/9780226282428.001.0001

GARBINO, G. S. T. *et al*. **Updated checklist of Brazilian bats**. Versão 2020. [*S. l.*]: Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (SBEQ), 2020.

GARROWAY, C. J.; BRODERS, H. G. Day roost characteristics of northern long-eared bats (*Myotis septentrionalis*) in relation to female reproductive status. **Écoscience**, v. 15, n. 1, p. 89–93, 2008.

GARTON, E. O. *et al*. Experimental Design for Radiotelemetry Studies. *In*: MILLSPAUGH, J. J.; MARZLUFF, J. M. (ed.). **Radio Tracking and animal populations**. [*S. l.*]: Academic Press, 2001. cap. 2, p. 15–42. DOI: 10.1016/B978-012497781-5/50003-7

GIANNINI, N. P.; BARQUEZ, R. M. Sturnira erythromos. **Mammalian Species**, n. 729, p. 1–5, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1644/729. Acesso em: 31 ago. 2024.

GIBB, R. *et al*. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. **Methods in Ecology and Evolution**, p. 1-17, 2018. DOI: 10.1111/2041-210X.13101

GIBBONS, W. J.; ANDREWS, K. M. PIT tagging: simple technology at its best. **Bioscience**, v. 54, n. 5, p. 447–454, 2004. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0447:PTSTAI]2.0.CO;2

GOMES, A. M.; SILVA, L. H. D.; TAVARES, V. C. Morcegos associados a ecossistemas ferruginosos de Minas Gerais. *In*: CARMO, F.; KAMINO, L. H (ed.). **Geossistemas ferruginosos do Brasil**: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Belo Horizonte: Editora 3i, 2015. p. 233–258.

GOMES, A. M. **Uso de hábitat por morcegos em ecossistemas ferruginosos**: um subsídio para a conservação. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GOMES, A. M. *et al*. Seleção de cavernas ferruginosas como abrigo por morcegos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32., 2013, Barreiras. **Anais** [...]. Barreiras: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2013.

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

GREGORIN, R.; TADDEI, V. A. Chave artificial para a identificação de Molossídeos brasileiros (Mammalia, Chiroptera). **Mastozoología Neotropical / J. Neotrop. Mammal.,** v. 9, n. 1, p. 13–32, 2002.

GRIFFIN, D. R. Migrations of New England bats. **Bull. Mus. Comp. Zool**., v. 86, n. 6, p. 217–246, 1940.

HILL, A. P. *et al*. AudioMoth: evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 5, p. 1199–1211, 2018. DOI: 10.1111/2041-210X.12955

HINTZE, F. *et al*. Uma nota de precaução sobre a identificação automática de chamados de ecolocalização de morcegos no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Mastozoologia**, v. 77, p. 163–171, 2016.

HOENNER, X. *et al*. Australia's continental-scale acoustic tracking database and its automated quality control process. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–10, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2017.206

HRISTOV, N. I.; BETKE, M.; KUNZ, T. H. Applications of thermal infrared imaging for research in aeroecology. **Integrative and Comparative Biology**, v. 48, n. 1, p. 50–59, 2008. doi: 10.1093/icb/icn053

JONES, G. Scaling of echolocation call parameters in bats. **Journal of Experimental Biology**, v. 202, n. 23, p. 3359–3367, 1999.

JONES, J. K.; HOOD, C. S. Synopsis of South American Bats of the Family Emballonuridae. **Occasional Papers The Museum Texas Tech University**, v. 155, p. 1–32, 1993.

JONES, G.; HOLDERIED, M. W. Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 274, n. 1612, p. 905–912, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0200. Acesso em: 30 ago. 2024.

JUNG, K., MOLINARI, J., KALKO, E. K. V. Driving Factors for the Evolution of Species-Specific Echolocation Call Design in New World Free-Tailed Bats (Molossidae). **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085279. Acesso em: 30 ago. 2024.

KAYS, R. *et al*. Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. **Science**, v. 348, n. 6240, 2015. DOI: 10.1126/science.aaa2478

KECK, M. B. Test for detrimental effects of PIT tags in neonatal snakes. **Copeia**, n. 1, p. 226–228, 1994. DOI: 10.2307/1446690

KENWARD, R. **A manual for wildlife radio tagging**. 2nd ed. New York: Academic Press, 2001.

KENWARD, R. **Wildlife radio tagging: equipment, field techniques and data analysis**. [*S. l.*]: Academic Press, 1987. (Environmental Science, Biology).

KLOEPPER, L. N. *et al*. Estimating colony sizes of emerging bats using acoustic recordings. **Royal Society Open Science**, v. 3, p. 1-5, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rsos.160022. Acesso em: 30 ago. 2024.

KOGER, B. *et al*. Quantifying the movement, behaviour and

environmental context of group-living animals using drones and computer vision. **Journal of Animal Ecology**, v. 92, p. 1357–1371, 2023. DOI: 10.1111/1365-2656.13904

KUNZ, T.H.; WEISE, C.D. Methods and Devices for Marking Bats. *In*: KUNZ, T. H.; PARSONS, S. (ed.). **Ecological and Behavioral Methods for the Study of Bats**. 2nd ed. Baltimre: Johns Hopkins University Press, 2009. p. 36-56.

KUNZ, T.H. Resource utilization: temporal and spatial components of bat activity in central Iowa. **Journal of Mammalogy**, v. 54, n. 1, p. 14-32, 1973.

KUNZ, T. H. Roosting ecology. *In*: KUNZ, T. H. (ed.). **Ecology of bats**. New York; London: Plenum Press, 1982. p. 1- 55.

KUNZ, T. H.; BROCK, C. E. A comparison of mist nets and ultrasonic detectors for monitoring flight activity of bats. **Journal of Mammalogy**, v. 56, n. 4, p. 907-911, 1975.

LADLE, R. J. *et al*. Unexplored diversity and conservation potential of Neotropical hot caves. **Conservation Biology**, v. 26, n. 6, p. 978– 982, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01936.x. Acesso em: 1 set. 2024.

LASSIEUR, S.; WILSON, D.E. Lonchorhina aurita. **Mammalian Species**, n. 347, p. 1-4, 1989.

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, 2021a. Disponível em: https://doi.org/10.31687/saremMN.21.28.2.0.08.e0608. Acesso em: 2 set. 2024.

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. 58, n. 2, p. 1–11, 2021b. DOI:10.1080/01650521.2021.1964910

LÓPEZ-BAUCELLS, A. *et al*. Stronger together: combining automated classifiers with manual post-validation optimizes the workload vs reliability trade-off of species identification in bat acoustic surveys. **Ecological Informatics**, v. 49, p. 45– 53, 2019. DOI:10.1016/j.ecoinf.2018.11.004

LÓPEZ-BAUCELS, A. *et. al*. **Field Guide to Amazonian Bats**. Manaus: INPA, 2016.

LÓPEZ-BOSCH, D. *et al*. Bat echolocation in continental China: a systematic review and first acoustic identification key for the country. **Mammal Research**, v. 66, p. 405-416, 2021. DOI: 10.1007/s13364-021-00570-x

LOURENÇO, E. C. **Marcação-recaptura de morcegos**: relevância e exemplos para estudos ecológicos. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Animal) – Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MARTINS, F. D.; KAMINO, L. H. Y.; RIBEIRO, K. T. **Projeto Cenários**: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em carajás 1. ed. Tubarão: Copiart, 2018.

MATTHÄUS, L.; KUGELSCHAFTER, K.; FIETZ, J. Evaluation of different monitoring methods at maternity roosts of greater mouse-eared bats (*Myotis myotis*). **Biodiversity Conservation**, v. 31, p. 1289-1312, 2022.

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. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.01.012. Acesso em: 2 set. 2024.

MELLO, M. A. R. Radiotelemetria aplicada a estudos sobre morcegos. *In*: REIS, N. R. *et al*. (ed.). **Técnicas de estudo aplicadas aos mamíferos silvestres brasileiros**. Rio de Janeiro: Technical Books Editora, 2010. p. 70-88

MELO, A. S.; HEPP, L. U. Ferramentas estatísticas para análises de dados provenientes de biomonitoramento. **Oecol. Bras.**, v. 12, n. 3, p. 463–486, 2008.

MERAMO, K. *et al*. Contrasting effects of chronic anthropogenic disturbance on activity and species richness of insectivorous bats in Neotropical dry forest. **Frontiers in Ecology and Evoution**, v. 10, p. 1-13, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fevo.2022.822415. Acesso em: 2 set. 2024.

MORAS, L. M. *et al*. Uncovering the diversity of dog-faced bats of the genus Cynomops (Chiroptera: Molossidae), with the redescription of C. milleri and the description of two new species. **Mammalian Biology**, v. 89, n. 1, p. 37-51, 2018. DOI:10.1016/j.mambio.2017.12.005

MORAS, L. M.; GOMES, A. M. E.; TAVARES, V. C. Distribution and taxonomy of the common big-eared bat *Micronycteris microtis* (Chiroptera: Phyllostomidae) in South America. **Mammalia**, v. 79, n. 4, 2015. DOI: 10.1515/mammalia-2014-0057

MORATELLI, R. **Chave artificial para identificação das espécies de *Myotis* Kaup, 1829 reconhecidas para o Brasil**. 2009. Programa de Biodiveridade e Saúde, Fiocruz, [*S. l.*], 2009.

MORATELLI, R.; DIAS, D. A new species of nectar-feeding bat, genus Lonchophylla, from the Caatinga of Brazil (Chiroptera, Phyllostomidae). **ZooKeys**, v. 514, p. 73–91, 2015. DOI: 10.3897/zookeys.514.10013

MURRAY, K. L. *et al*. Surveying bat communities: a comparison between mist nets and the Anabat II bat detector system. **Acta Chiropterologica**, v 1, n. 1, p. 105-112, 1999.

NAGORSEN, D. W.; PETERSON, R. L. **Mammal collectors' manual**: a guide for collecting, documenting, and preparing mammal specimens for scientific research. Toronto: Royal Ontario Museum, 1980. (Life Sciences Miscellaneous Publications Royal Ontario Museum).

ORTEGA, J.; ARITA, H.T. *Mimon bennettii*. **Mammalian Species**, Northampton, v. 549, p. 1-4, 1997.

OTÁLORA-ARDILA, A. *et al*. 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. Disponível em: https://doi.org/10.3161/15081109ACC2019.21.2.016. Acesso em: 02 set. 2024.

PACHECO, S. M. Técnicas de campo empregadas no estudo de

quirópteros. **Caderno La Salle XI**, Canoas, v. 2, n. 1, p. 193–205, 2004.

PECK, S. B.; RUIZ-BALIÚ, A. E.; GONZÁLES, G. F. G. The cave-inhabiting beetles of Cuba (Insecta: Coleoptera): diversity, distribution and ecology. **Journal of Caveand Karst Studies**, v. 60, n. 3, p. 156–166, 1998.

PEREA, S.; TENA, E. Different bat detectors and processing software... Same results?. **Journal of Bat Research & Conservation**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 2020.

PEREIRA, M. S. R., REIS, A. da S., TAVARES, V. da C. Morcegos. *In*: ZAMPAULO, R. de A. PROUS, X. (ed.). **Fauna cavernícola**. Belo Horizonte: Editora Rupestre, 2022. p. 546–569.

PILÓ, L. B. *et al*. Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia. **PLoS ONE**, v. 18, n. 5, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0267870

PIMENTEL, N.T. *et al.* Estimates of insect consumption and guano input in bat caves in Brazil. **Mammal Research**, v. 67, n. 10, p. 355–366, 2022.

PIOVEZAN, U.; ANDRIOLO, A. **A vida selvagem e as ondas do rádio**: apenas uma técnica chamada telemetria. Corumbá: Embrapa Pantanal, c2004. 28 p. (Documentos, n. 71).

POWELL, R. A.; MITCHELL, M. S. What is a home range? ***Journal of Mammalogy***, v. 93, n. 4, p. 948–958, 2012.

REIS, A. S. *et al*. Variation of dipteran ectoparasites (Streblidae) on *Anoura geoffroyi* Gray, 1838 (Phyllostomidae) in two caves in southeastern Brazil. **Parasitology Research**, v. 121, p. 255–265, 2021. DOI: 10.1007/s00436-021-07385-4

REIS, A. S.; ZAMPAULO, R. A.; TALAMONI, S. A. Aspectos ecológicos de duas grandes colônias de morcegos nectarívoros *(Anoura Geoffroyi* Gray, 1838) residentes em cavernas no Brasil: implicações para conservação. **Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp**, v. 1, n. 11, p. 40–64, 2022.

REIS, N. R. *et al*. **História natural dos morcegos brasileiros**: chave de identificação de espécies. Rio de Janeiro: Technical Books Editora: 2017. p. 416.

ŘEŘUCHA Š. *et al*. The BAARA (Biological AutomAted RAdiotracking) System: a new approach in ecological field studies. **PLoS ONE**, v. 10, n. 2, 2015.

Revilla-Martín, N. *et al*. Monitoring cave-dwelling bats using remote passive acoustic detectors: a new approach for cave monitoring. **Bioacoustics**, v. 30, n. 5, p. 527–542, 2021. DOI:10.1080/09524622.2020.1816492

RIBEIRO, M. S. **Uso de habitat pelo Smoky bat *Furipterus horrens* em mosaicos de floresta amazônica fragmentada e continua**. 2019. 41 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Vertebrados) – Programa de Pós-Graduação em Biologia dos Vertebrados, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

RIGBY, E. L. *et al*. Impact of PIT tagging on recapture rates, body condition and reproductive success of wild Daubenton's bats (*Myotis daubentonii*). **Veterinary Record**, v. 170, n. 4, p. 101–101, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1136/vr.100075. Acesso em: 5 set. 2024.

ROCHA, P. A. **Quiropterofauna cavernícola**: composição, estrutura de comunidade, distribuição geográfica. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas – Zoologia) – Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 2013.

RODRIGUES, E. *et al*. Multi-objective tracking applied to bat populations. *In*: SYMPOSIUM ON VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY (SVR), 28., 2016, Gramado. **Anais** [...]. Gramado: IEEE Computer Society, 2016. p. 155–159. DOI:10.1109/SVR.2016.35

RODRÍGUEZ-DURÁN, A.; SOTO-CENTENO, J. A. Temperature selection by tropical bats roosting in caves. **Journal of Thermal Biology**, v. 28, n. 6–7, p. 465– 468, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0306-4565(03)00046-9. Acesso em: 5 set. 2024.

ROSADA, T. R. *et al*. Morcegos (Chiroptera, Mammalia) que utilizam cavidades naturais antropizadas na região de Ouro Preto, Minas Gerais. *In*: RASTEIRO, M. A.; SALLUN FILHO, W. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33., 2015, Eldorado. **Anais** [...]. Campinas: SBE, 2015. p.135–147. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_135-147.pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

RUSSO, D.; ANCILLOTTO, L.; JONES, G. Bats are still not birds in the digital era: echolocation call variation and why it matters for bat species identification. **Canadian Journal of Zoology**, v. 96, n. 2, p. 63–78, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1139/cjz-2017-0089. Acesso em: 5 set. 2024.

SANTOS, B. S. **Ecologia e conservação de morcegos cavernícolas na bacia metassedimentar do Rio pardo – sul da Bahia**. 2001. 66 f. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2001.

SCHOWALTER, D. B. Swarming, reproduction, and early hibernation of *Myotis lucifugus* and *M. volans* in Alberta, Canada. **Journal of Mammalogy**, v. 61, n. 2, p. 350–354, 1980. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1380065. Acesso em: 5 set. 2024.

SILVA, R. M. *et al*. Descoloração do pêlo como método de marcar morcegos para observações comportamentais. **Chiroptera Neotropical**, v. 13, n. 2, p. 323–325, 2007.

SIMMONS, N. B. **A new species of Micronycteris (Chiroptera: Phyllostomidae) from Northeastern Brazil, with comments on phylogenetic relationships**. New York: American Museum of Natural History, c1996. (American Museum novitates, n. 3158).

SHUMP JR.; K. A.; SHUMP, A. U. *Lasiurus cinereus*. **Mammalian Species**, v. 185, p. 1–5, 1982.

SKALAK, S. L.; SHERWIN, R. E.; BRIGHAM, R. M. Sampling period, size and duration influence measures of bat species richness from acoustic surveys. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, n. 3, p. 490–502, 2012. DOI:10.1111/j.2041-210X.2011.00177.x

SMYTH, B.; NEBEL, S. Passive Integrated Transponder (PIT) Tags in the study of animal movement. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 4, p. 1–5, 2013.

SUEUR, J. *et al*. Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 100,

n. 4, p. 772–781, 2014. DOI: 10.3813/AAA.918757

TALAMONI, A. S. *et al*. Bat assemblages in conservation areas of a metropolitan region in Southeastern Brazil, including an important karst habitat. **Brazilian Journal of Biology**, v. 73, n. 1, p. 1–11, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1519-69842013000200011. Acesso em: 5 set. 2024.

TAVARES VDC, RIBEIRO MS, PROUS X, NOTINI AA, KAKU-OLIVEIRA NY, MACIEL LMD, *et al.* (2025) Do you have enough space? Habitat selection of insectivorous cave-dwelling bats in fragmented landscapes of Eastern Amazon. PLoS ONE 20(1): e0296137. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296137

TEJEDOR, A.; SILVA-TABOADA, G.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, D. Discovery of extant *Natalus major* (Chiroptera: Natalidae) in Cuba. **Mammalian Biology**, v. 69, p. 153–162, 2004.

TEJEDOR, A.; TAVARES, V. D. C.; SILVA-TABOADA, G. A revision of extant Greater Antillean bats of the genus *Natalus*. **American Museum Novitate**, n. 3493, p. 1–22, 2005. DOI:10.1206/0003-0082(2005)493[0001:AROEGA]2.0.CO;2

TOMKIEWICZ, S. M. *et al*. Global positioning system and associated technologies in animal behaviour and ecological research. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**., v. 365, n. 1550, p. 2163–76, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0090. Acesso em: 5 set. 2024.

TORQUETTI, C. G.; ASSIS, M. A. C.; CARMO, S. S. A.; TALAMONI, S. A. Observations of a diurnal roost of the white-winged vampire bat *Diaemus youngi* in a karstic area of southeastern Brazil. **Chiroptera Neotropical**, v. 19, n. 1, p. 1147–1150, 2013.

TORQUETTI, C. G.; SILVA, M. X.; TALAMONI, V. Differences between caves with and without bats in a Brazilian karst habitat. **Zoologia (Curitiba)**, v. 34, p. 1–7, 2017.

TOWSEY, M.; PARSONS, S.; SUEUR, J. Ecology and acoustics at a large scale. **Ecological Informatics**, v. 21, p. 1–3, 2014. DOI:10.1016/j.ecoinf.2014.02.002

TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do Sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Zool**., v. 2, n. 5, p. 255–320, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0101-81751984000100001. Acesso em: 5 set. 2024.

TRAJANO, E. Protecting caves for the bats or bats for the caves? **Chiroptera Neotropicall**, v. 1, n. 2, p. 19–21, 1995.

TRAJANO, E. Movements of cave bats in Southeastem Brazil, with emphasis on the population ecology of the common vampire bat, *Desmodus rotundus* (Chiroptera). **Biotropica**, v. 28, n. 1, p. 121–129, 1996.

TRAJANO, E.; GNASPINI-NETTO, P. Composição da fauna cavernícola brasileira, com uma análise da distribuição dos táxons. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 7, n. 3, p. 383–407, 1991. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0101-81751990000300017. Acesso em: 5 set. 2024.

TREVELIN, L. C. *et al.* **FoCar – Fonoteca de Carajás**. [S. l.]: Instituto Tecnológico Vale e Vale S. A., 2025. Disponível em: https://arcg.is/SzvvC2. Acesso em: 11 set. 2025.

TUTTLE, M. D. Population ecology of the gray bat (*Myotis grisescens*): factors influencing early growth and development. **Occ. Pap. Mus. Nat. Hist., Univ. Kans**., v. 36, p. 1–24, 1975.

TUTTLE, M. D. Population Ecology of the Gray Bat (*Myotis Grisescens*): factors Influencing Growth and Survival of Newly Volant Young. **Ecology**, v. 57, n. 3, p. 587–595, 1976. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1936443. Acesso em: 6 Set. 2024.

VAN HARTEN E. *et al*. High detectability with low impact: Optimizing large PIT tracking systems for cave-dwelling bats. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 19, p. 10916–10928, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ece3.5482. Acesso em: 5 set. 2024.

VAN HARTEN, E. *et al*. Low Rates of PIT-Tag Loss in an Insectivorous Bat Species. **Journal of Wildlife Management**, v. 85, n. 8, p. 1739–1743, 2021. DOI: 10.1002/jwmg.22114

VARGAS-MENA, J. C. *et al*. Inside or out? Cave size and landscape effects on cave-roosting bat assemblages in Brazilian Caatinga caves. **Journal of Mammalogy**, v. 101, n. 2, p. 464–475, 2020. DOI: 10.1093/jmammal/gyz206

VELAZCO, P. M. *et al*. A new species of nectar-feeding bat of the genus *Hsunycteris* (Phyllostomidae: Lonchophyllinae) from northeastern Peru. **American Museum Novitates**, n. 3881, p. 1–26, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1206/3881.1. Acesso em: 5 set. 2024.

VIZOTTO, L. D.; TADDEI, V. A. Chave para a determinação de quirópteros brasileiros. **Boletim de Ciências da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras**, v. 1, n. 1, p. 1– 72. 1973.

VOSS, R. S. *et al*. Roosting ecology of amazonian bats: evidence for guild structure in hyperdiverse mammalian communities. **American Museum Novitates**, n. 3870, p. 1–43, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1206/3870.1. Acesso em: 5 set. 2024.

WALTERS, C. L. *et al*. Challenges of using bioacoustics to globally monitor bats. **Bat evolution, ecology, and conservation**, p. 479–499, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-7397-8_23

WALTERS, C. L. *et al*. Challenges of Using Bioacoustics to Globally Monitor Bats. *In*: ADAMS, R.; PEDERSEN, S. (ed.) **Bat evolution, ecology, and conservation**. New York: Springer, 2013. cap. 13. DOI: 10.1007/978-1-4614-7397-8_23

WILKINSON, G. S.; BRADBURY, J. W. Radio telemetry: techniques and analysis. *In*: KUNZ, T. H. (ed.). **Ecological and Behavioral Methods for the Study of Bats**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1988. cap. 7, p. 105–124.

ZAMORA–GUTIERREZ, V. *et al*. The Sonozotz project: assembling an echolocation call library for bats in a megadiverse country. **Ecology and Evolution**, v. 10, n. 11, p. 4928–4943, 2020. DOI: 10.1002/ece3.6245



5

Caverna / Cave S11D_0001
Foto/Photo: Robson de A. Zampaulo

Monitoramento climático em cavernas ferríferas

LÍVIA DORNELES AUDINO
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

1 INTRODUÇÃO

Frente ao atual cenário de aquecimento global, os estudos climáticos têm sido considerados cada vez mais urgentes e tópicos de pesquisa fundamentais tanto para ecossistemas epígeos, de superfície (Pereira *et al.*, 2024), como para os ecossistemas subterrâneos ou hipógeos (Ferreira *et al.*, 2025; Mammola *et al.*, 2019, 2020; Sánchez-Fernández *et al.*, 2021).

Por definição, o clima é o conjunto de condições atmosféricas (quantificação de suas médias e variações) de um determinado local por um período de meses a anos (Bothe, 2018; Werndl, 2016). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial o período clássico de avaliação das variáveis climáticas deveria ser de no mínimo três décadas consecutivas (WMO, 2017). De modo geral, os elementos climáticos tipicamente estudados são radiação solar, temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos (Bothe, 2018; Werndl, 2016).

Apesar de não existirem estudos climáticos de longo prazo em cavernas ferríferas publicados, para outras litologias já está bem estabelecido na literatura científica, que as cavernas são ambientes singulares, com condições climáticas geralmente diferentes das encontradas no meio externo (e.g. Badino, 2010; Culver; Pipan, 2009; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020; Poulson; White, 1969). Isto ocorre, porque as cavernas são consideradas sistemas semifechados, com ausência de luz, baixa incidência de radiação solar e marcante estabilidade climática (Lobo, 2012; Poulson; White, 1969). Independente da zona climática, latitude, altitude, litologia e morfologia, a maioria dos ambientes subterrâneos apresentam temperatura e umidade constantes ao longo do tempo, com menor amplitude em relação à superfície (Badino, 2004, 2010; Culver; Pipan, 2009; Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020; Poulson; White, 1969).

Em geral, as taxas de evaporação são baixas, e correntes de ar e até mesmo ventos fortes podem acontecer a grandes distâncias da entrada ativados pelo "efeito chaminé"

Climate monitoring in ferriferous caves

LÍVIA DORNELES AUDINO
ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

1 INTRODUCTION

In the face of the current scenario of global warming, climate studies have become increasingly urgent and fundamental research topics for surface or epigean ecosystems (Pereira *et al.*, 2024) as well as for subterranean or hypogean ecosystems (Ferreira *et al.*, 2025; Mammola *et al.*, 2019, 2020; Sánchez-Fernández *et al.*, 2021).

By definition, climate is the set of atmospheric conditions (quantification of their averages and variation) for a given location over a period of months to years (Bothe, 2018; Werndl, 2016). According to the World Meteorological Organization, the classic period of time for evaluating climatic variables is at least three consecutive decades (WMO, 2017). The typically-studied climatic variables are solar radiation, temperature, humidity, atmospheric pressure, and wind speed and direction (Bothe, 2018; Werndl, 2016).

Although there are no published long-term climate studies of ferriferous caves, it has already been well established for other lithologies that caves are unique environments, with climatic conditions that generally differ from those found in the external environment (e.g., Badino, 2010; Culver; Pipan, 2009; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020; Poulson; White, 1969). This difference is because caves are considered semi-closed systems, with no light, low incidence of solar radiation and remarkable climatic stability (Lobo, 2012; Poulson; White, 1969). Regardless of the climatic zone, latitude, altitude, lithology or morphology, most subterranean environments present constant temperature and humidity over time, with a lower amplitude in relation to the surface (Badino, 2004, 2010; Culver; Pipan, 2009; Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020; Poulson; White, 1969).

In general, evaporation rates in caves are low, while air currents and even strong winds can occur at great distances from the entrance activated by the "chimney effect"

(dissimilaridades na densidade entre o ar externo e subterrâneo, que resultam em diferenças de pressão produzindo o fluxo de ar), pela circulação de rios subterrâneos e por variações na pressão barométrica (Gabrovsek, 2023; Poulson; White, 1969). A umidade relativa do ar encontra-se próxima a saturação (Culver; Pipan, 2009; Poulson; White, 1969) e a temperatura média diária é geralmente menor em relação ao meio externo, com médias termais próximas a média anual da temperatura da superfície (Medina *et al.,* 2023; Poulson; White, 1969). Esta temperatura média é menor, porque o ar externo que entra nas cavernas sofre com o efeito de amortecimento causado pelo aumento da umidade relativa, assim a temperatura passa a se equilibrar com a temperatura da rocha e com a água que percola o ecossistema cavernícola (Badino, 2004, 2010; Medina *et al.,* 2023). Todas estas condições ficam ainda mais pronunciadas com o aumento da distância em relação a superfície. Em maiores profundidades, temos, por exemplo, uma redução da amplitude das variações temporais dos parâmetros climáticos, fenômeno este conhecido como efeito de amortecimento (Badino, 2010; Dominguez-Villar *et al.,* 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.,* 2023).

Ao comparar o clima das cavernas com o do meio externo é possível observar uma evidente estabilidade no meio hipógeo, que pode dar a impressão de que as condições climáticas são praticamente constantes temporalmente. No entanto, ao mudar a escala de observação, verifica-se que o ambiente subterrâneo pode ser extremamente complexo e dinâmico, com a temperatura e umidade apresentando variações sazonais ao longo do ano, podendo exibir, inclusive, padrões cíclicos diários (Mammola *et al.,* 2019; Medina *et al.,* 2023; Mejía-Ortiz *et al.,* 2020). No entanto, estudos já mostraram que a umidade relativa pode ser menos variável que a temperatura no interior do ambiente cavernícola (Mejía-Ortiz *et al.,* 2021). Além disso, as características climáticas podem apresentar variações ao longo de uma mesma caverna, a depender de sua morfologia, e entre cavernas diferentes (Badino, 2010; Gomes *et al.,* 2021a).

Por exemplo, o interior de uma caverna pode ser dividido em três diferentes zonas de luminosidade, que se distinguem em relação às suas condições climáticas devido a influência da luz solar. Estas três zonas são: zona fótica (ou de entrada), disfótica ou de penumbra e afótica (Figura 1). A zona fótica é aquela que se encontra mais próxima da entrada da caverna, apresentando maior superfície de contato com o meio externo. Por este motivo, recebe maior incidência de luz solar, e geralmente apresenta maior temperatura, menor umidade média e maior

(dissimilarities in density between external and subterranean air, which result in pressure differences producing air flow), by the circulation of underground rivers and by variations in barometric pressure (Gabrovsek, 2023; Poulson; White, 1969). The relative humidity of cave air is close to saturation (Culver; Pipan, 2009; Poulson; White, 1969) and the average daily temperature is generally lower than that of the external environment, with thermal averages close to the annual average surface temperature (Medina *et al.*, 2023; Poulson; White, 1969). This average temperature in caves is lower because the entering external air experiences a buffering effect from the increase in relative humidity. Thus, the temperature begins to balance with the temperature of the rock and with the water that percolates through the cave ecosystem (Badino, 2004, 2010; Medina *et al.*, 2023). All of these conditions become even more pronounced with increasing distance from the surface. At greater depths there is, for example, a reduction in the amplitude of temporal variation in climatic parameters, a phenomenon known as the buffering effect (Badino, 2010; Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023).

Comparing the climate of caves with that of their external environment reveals a clear stability in the hypogean environment, which can give the impression that the climatic conditions are practically constants over time. However, changing the scale of observation, the subterranean environment can found to be extremely complex and dynamic, with temperature and humidity presenting seasonal variation throughout the year and perhaps even daily cyclical patterns (Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020). Nonetheless, studies have shown that relative humidity can be less variable than temperature inside a cave (Mejía-Ortiz *et al.*, 2021). Furthermore, climatic characteristics can vary throughout the same cave, depending on its morphology, and between different caves (Badino, 2010; Gomes *et al.*, 2021a).

For example, the interior of a cave can be divided into three different light zones – euphotic, disphotic or penumbra, and aphotic – which are distinguished in relation to their climatic conditions due to the influence of sunlight (Figure 1). The euphotic (or entrance) zone is closest to the cave entrance and has a greater surface area in contact with the external environment. For this reason, it receives a greater incidence of sunlight and, generally, has higher temperature and lower

amplitude destes atributos. A zona disfótica, também conhecida como zona de penumbra, está localizada na transição entre as zonas de entrada (fótica) e afótica. Neste local existe uma atenuação da incidência de luz solar e, por este motivo, todas as características climáticas citadas anteriormente também se atenuam. E, a zona afótica, que se caracteriza pela ausência completa de luz e, que em geral, se localiza nas regiões mais profundas da caverna, apresentando os menores valores médios de temperatura e maiores taxas de umidade, assim como menor variação temporal destas variáveis (Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mejía-Ortiz *et al.*, 2021; Poulson; White, 1969). De forma geral, boa parte das cavernas associadas a formação ferrífera são de pequenas dimensões quando comparadas a outros litotipos e, portanto, em geral, não apresentam zonas afóticas.

average humidity, with a greater amplitude of these variables. The disphotic zone, also known as the penumbra zone, is located in the transition between the euphotic (entrance) and aphotic zones. This location possesses an attenuation of sunlight incidence and so all the climatic variables mentioned above are also attenuated. The aphotic zone, which is characterized by the complete absence of light and is generally located in the deepest regions of a cave, has the lowest average temperature and highest humidity, as well as the lowest temporal variation in these variables (Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mejía-Ortiz *et al.*, 2021; Poulson; White, 1969). Many of the caves associated with ferriferous formations are small when compared to those of other lithotypes and, therefore, generally do not have aphotic zones.



Figura 1: Zonas de luminosidade que podem ser encontradas dentro do sistema cavernícola: zona fótica ou zona de entrada, zona disfótica ou de penumbra e zona afótica.

Figure 1: Light zones that could be found inside a cave: euphotic or entrance zone, disphotic or penumbra zone and aphotic zone.

As propriedades climáticas do meio hipógeo são também determinadas pelas características individuais de cada caverna, tais como morfologia interna/topografia, quantidade, distribuição espacial e geometria das entradas, propriedades da rocha, altitude, latitude, circulação de água e ar e vegetação do entorno (Gomes *et al.,* 2021a; Lobo, 2012; Medina *et al.,* 2023). Por exemplo, cavernas inseridas na formação ferrífera, que ocorrem relativamente próximas à superfície e são de tamanho pequeno (Ferreira *et al.,* 2018; Piló; Coelho; Reino, 2015), podem, em teoria, exibir flutuações temporais mais acentuadas de temperatura e umidade em relação às cavernas de outras litologias (que estão mais distantes da superfície e são maiores em tamanho) (Pipan *et al.,* 2011). Além disso, algumas rochas apresentam maior condutividade térmica que outras, o que influencia o clima do meio hipógeo (Guerrier *et al.,* 2019; Medina *et al.,* 2023). Sendo assim, cavernas de litologias distintas podem apresentar dinâmicas e propriedades climáticas particulares. No entanto, até o momento não existem no Brasil estudos que comparem efetivamente as características climáticas de cavernas em diferentes litologias.

Por sua vez, o clima do meio externo apresenta uma influência direta sobre o clima das cavernas (Badino, 2004, 2010; Medina *et al.,* 2023). Nesse sentido, o sinal térmico atmosférico é transferido para o meio subterrâneo por condutividade pela base rochosa, onde eventualmente alcança a profundidade do sistema. Se diz, "eventualmente", porque existe um atraso da influência climática do meio externo sobre o clima da caverna. Este atraso acontece, principalmente, devido a inércia da rocha e infiltração hídrica, que aumenta com a profundidade do ambiente (Badino, 2004, 2010). Outras variáveis também podem influenciar este atraso entre os dois climas, tais como: características geofísicas das camadas do solo acima da caverna, cobertura de vegetação da área acima da caverna, circulação de ar ou correntes de água e profundidade da caverna (espessura da rocha acima da caverna) (Mammola *et al.*, 2019). Nesse sentido, Medina *et al.,* (2023) identificou que existem três tipos de correlação entre o clima do meio epígeo e hipógeo, ao avaliar dados obtidos em monitoramentos realizados em cavernas de litologias distintas inseridas em diferentes zonas climáticas do mundo: 1) uma correlação positiva e alta, geralmente encontrada próximo à entrada das cavernas ou naquelas com muita influência do meio externo, onde o atraso é praticamente inexistente; 2) uma correlação positiva e baixa, encontrada em regiões mais profundas da caverna, havendo um atraso nesta influência; 3) uma correlação negativa, geralmente nas regiões mais profundas das cavernas, onde o atraso na influência é ainda

The climatic properties of the hypogean environment are also determined by the individual characteristics of each cave, such as internal morphology/topography; the quantity, spatial distribution and geometry of entrances; rock properties; altitude; latitude; water and air circulation; and surrounding vegetation (Gomes *et al.*, 2021a; Lobo, 2012; Medina *et al.*, 2023). For example, caves inserted in ferriferous formations, which occur relatively close to the surface and are small in size (Ferreira *et al.*, 2018; Piló; Coelho; Reino, 2015), can, in theory, exhibit more pronounced temporal fluctuations in temperature and humidity compared to caves of other lithologies (which are further from the surface and are larger in size) (Pipan *et al.*, 2011). Furthermore, some rocks have higher thermal conductivity than others, which influences the climate of the hypogean environment (Guerrier *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023). Therefore, caves with different lithologies often present particular dynamics and climatic properties. However, in Brazil have been no studies to date that have effectively compared the climatic characteristics of caves in different lithologies.

In turn, the climate of the external environment has a direct influence on the climate of caves (Badino, 2004, 2010; Medina *et al.*, 2023). In this sense, the thermal atmospheric signal is transferred to the subterranean environment by conductivity through the rock base, where it reaches the depth of the system. However, there is a delay in the climatic influence of the external environment on the climate of a cave due to the inertia of the rock and water infiltration, and so the delay increases with the depth of the environment (Badino, 2004, 2010). Other variables can also influence the delay between the two climates, such as geophysical characteristics of the soil layers and vegetation cover of the area above the cave, air circulation or water currents, and cave depth (thickness of the rock above the cave) (Mammola *et al.*, 2019). In this sense, Medina *et al.* (2023), when evaluating data obtained from monitoring caves of different lithologies located in different climatic zones of the world, identified three types of correlations between the epigean and the hypogean climate : 1) a positive and high correlation, generally found near the entrance of caves or in caves with extensive influence from the external environment, where the delay is practically nonexistent; 2) a positive and low correlation, found in deeper regions of caves, with a delay in this influence; 3) a negative correlation, generally in the deepest regions of caves, where the delay in the influence

maior. Estes diferentes comportamentos climáticos discutidos até aqui, podem ser observados nas Figuras de 2 a 4.

Na Figura 2 temos um gráfico esquemático mostrando a comparação entre a temperatura média diária do meio externo, da entrada e fundo (parte mais distal) da caverna em um período de 360 dias. Esta figura foi retirada e modificada do artigo científico de Mammola *et al.* (2019). Olhando para a figura é possível observar que a amplitude do sinal térmico é muito maior no meio externo em relação à entrada e fundo da caverna. No fundo da caverna temos uma amplitude nos valores de temperatura muito menor (efeito conhecido como amortecimento término). As temperaturas mínimas (quadrados) e máximas (círculos) são apresentadas para cada uma das regiões (meio externo, entrada e fundo da caverna). Além disso, o valor médio de temperatura anual do meio externo é apresentado através do pentágono. Nota-se que, principalmente, no fundo da caverna a temperatura atinge valores similares a média de temperatura anual do meio externo. Adicionalmente, é demonstrado que existe um atraso na influência da temperatura do meio externo sobre a temperatura da entrada e fundo da caverna, sendo este atraso maior no fundo. Nesse sentido, quando no meio externo a temperatura máxima é atingida, ou seja, quando existe um aumento da temperatura, esta condição somente vai se refletir na caverna depois de um tempo, que pode levar horas, dias ou meses. O mesmo acontece com a temperatura mínima.

is even greater. These different climatic behaviors discussed so far can be observed in Figures 2 to 4.

Figure 2 (taken and modified from Mammola *et al.* 2019) provides a schematic graph comparing the average daily temperature of the external environment with that of the cave entrance and deep inside the cave over a period of 360 days. The figure shows that the amplitude of the thermal signal is much greater for the external environment than for the cave entrance and deep cave, with a much smaller temperature amplitude (i.e., thermal buffering effect) for the deep cave. The minimum (squares) and maximum (circles) temperatures are presented for each of the regions (external environment, cave entrance, and deep inside the cave). In addition, the average annual temperature of the external environment is presented through the pentagon. It can be seen that, mainly at the deep cave, the temperature reaches values similar to the average annual temperature of the external environment. Additionally, there is a delay in the influence of the temperature of the external environment on the temperature of the entrance and the deep, with this delay being greater at the deep. In this sense, when the maximum temperature is reached in the external environment, that is, when there is an increase in temperature, the condition will only be reflected in the cave after a period of time, which may be hours, days or months. The same happens with the minimum temperature.

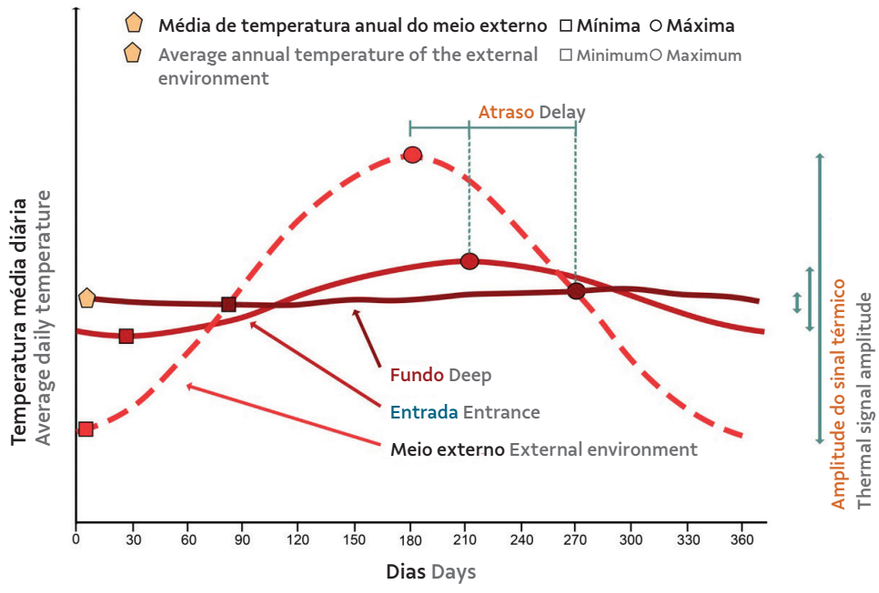


Figura 2: Gráfico esquemático mostrando a comparação entre a temperatura média diária do meio externo, da entrada e do fundo da caverna em um período de 360 dias. Modificado de Mammola *et al.*, (2019).

Figure 2: Schematic graph comparing the average daily temperature of the external environment with that of the cave entrance and cave deep over a period of 360 days (modified from Mammola *et al.*, 2019).

Os gráficos da Figura 3 e da Figura 4 foram elaborados a partir dos dados coletados no monitoramento climático do projeto Monitoramento Cava da Divisa (Mina de Brucutu), pertencente à empresa Vale S.A., que está sendo implementado no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. A Figura 3 mostra a comparação entre a dinâmica temporal de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%) da entrada e fundo da caverna BRU_0005 (meio hipógeo) inserida na formação ferrífera com seu

The graphs in Figure 3 and Figure 4 were prepared from data collected during climate monitoring by the Cava da Divisa (Brucutu mining) Monitoring Project of the company Vale S.A. that is being implemented in the municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, state of Minas Gerais. Figure 3 compares the temporal dynamics of temperature (°C) and relative humidity (%) at the entrance and deep of cave BRU_0005 (hypogean environment)

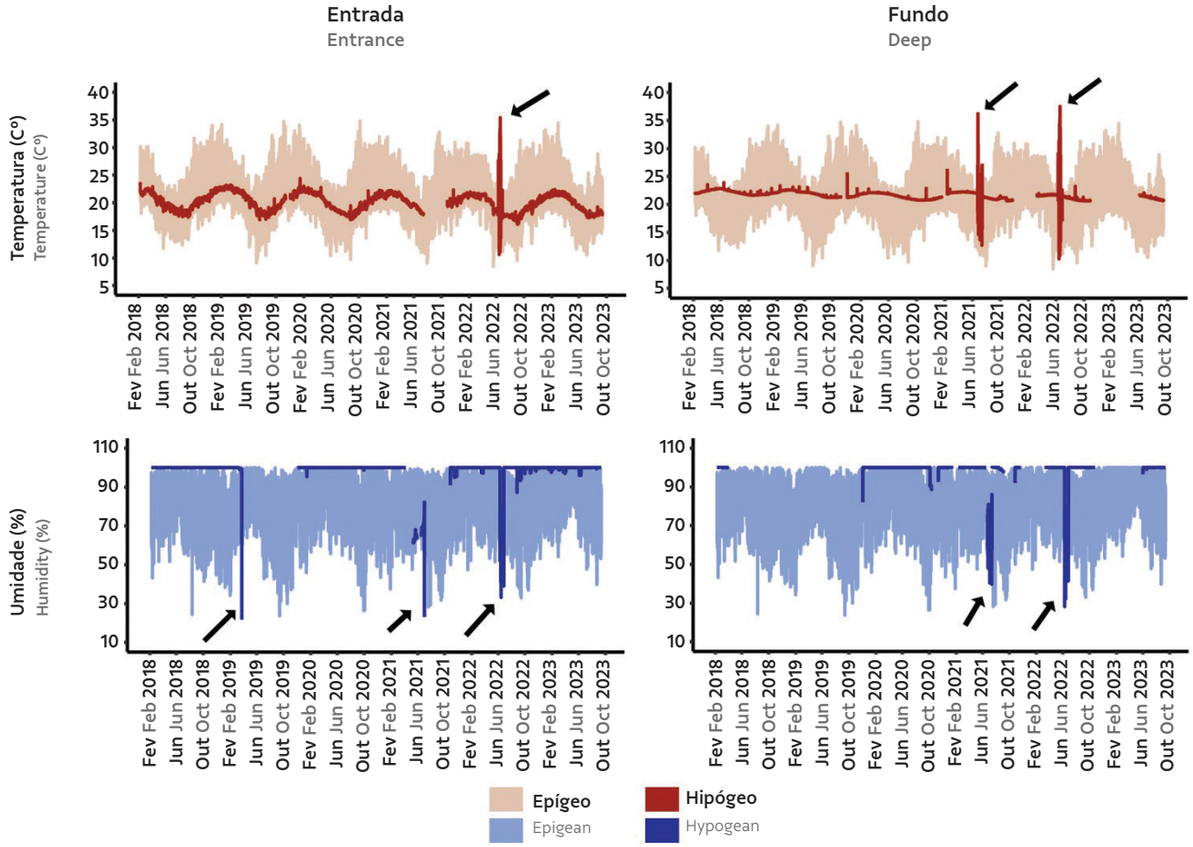


Figura 3: Comparação entre a dinâmica temporal de temperatura (°C) e a umidade relativa do ar (%) da entrada e do fundo da caverna BRU_0005 (meio hipógeo) inserida em uma formação ferrífera com seu meio externo (epígeo). Os dados aqui apresentados foram registrados com intervalos de hora em hora, entre fevereiro de 2018 e outubro de 2023 (período de mais de cinco anos). O corte na continuidade nas linhas do gráfico mostra que o registro não foi feito pelo *data logger* ou que o *data logger* registrou valores de 0% ou mais de 100%, no caso da umidade. Adicionalmente, as setas indicam a ocorrência de dados anômalos, muito diferente do que normalmente é registrado, o que possivelmente representa erros de medição do *data logger*. Fonte: Spelayon, 2023.

Figure 3: Comparison of the temporal dynamics of temperature (°C) and relative humidity (%) at the entrance and deep of cave BRU_0005 (hypogean environment) with that of its external environment (epigean). The data were recorded at hourly intervals between February 2018 and October 2023 (a period of more than five years). The break in the continuity of the graph lines shows that a record was not made by the *data logger* or that the *data logger* recorded, in the case of humidity, values of 0% or more than 100%. Arrows indicate the occurrence of anomalous data, different from what is normally recorded, which possibly represents *data logger* measurement errors. Source: Spelayon, 2023.

meio externo (epígeo). Os dados apresentados foram registrados com intervalos de hora em hora entre fevereiro de 2018 e outubro de 2023 (período de mais de cinco anos). Nos gráficos é possível perceber que tanto a temperatura como a umidade do meio externo apresentaram maior variação nos valores ao longo do tempo em relação a entrada e fundo da caverna. A média de temperatura e de umidade foi, respectivamente, maior e menor no meio externo em relação a entrada e fundo da caverna, de acordo com análise de média realizada no estudo. Além disso, a temperatura do fundo da cavidade foi mais estável ao longo do tempo em comparação com a temperatura da entrada. A dinâmica temporal da temperatura da entrada da caverna apresentou um padrão marcadamente sazonal, mais semelhante com o meio externo, diferente do fundo da cavidade. Já, a umidade permaneceu praticamente constante e próximo a saturação durante a maior parte do tempo de monitoramento, tanto na entrada como no fundo da caverna. Através dos gráficos também é possível observar que os dados de umidade apresentaram mais problemas de medição que os de temperatura. O corte na continuidade nas linhas do gráfico mostra que o registro não foi feito pelo *data logger* ou que o *data logger* registrou valores de 0% ou mais de 100%, no caso da umidade. Adicionalmente, as setas indicam a ocorrência de dados anômalos, muito diferente do que é normalmente registrado, o que possivelmente representam erros de medição do *data logger*. Novamente, a frequência no aparecimento destes erros é maior com os registros de umidade em relação aos de temperatura.

A Figura 4 mostra a correlação entre a temperatura do meio externo (epígeo) e temperatura do interior (meio hipógeo) das cavernas BRU_0005 e MDIR_0028. Nos gráficos são apresentados os valores de correlação de Pearson (r) e de "p". O "p" indica se a correlação foi significativa ou não. Valores de $p < 0,05$ mostram que a correlação foi significativa e de $p > 0,05$ que não foi significativa. Quanto maior o valor de "r" maior a influência da temperatura do meio externo sobre a temperatura da caverna. No gráfico "a" temos a correlação entre a temperatura do meio externo com a temperatura da entrada da caverna BRU_0005 (ver figura anterior – Figura 3 – para maiores detalhes sobre a dinâmica temporal da temperatura em ambos os ambientes). Neste caso a correlação é positiva, significativa e alta (63%), mostrando que o clima do meio externo está influenciando o clima da caverna quase sem nenhum atraso em sua influência. Este padrão é comum de ser encontrado na entrada das cavernas, ou em cavernas de menor tamanho, que apresentam

inserted in a ferriferous formation, and its external environment (epigean). The data were recorded at hourly intervals between February 2018 and October 2023 (a period of more than five years). The graphs show that both the temperature and humidity of the external environment varied more over time than they did at the cave entrance and deep zones. The average temperature and humidity were, respectively, higher and lower in the external environment in relation to the cave entrance and deep, according to the average analysis carried out in the study. Furthermore, the temperature at the deep cave was more stable over time compared to the temperature at the entrance. The temporal dynamics of temperature at the cave entrance showed a markedly seasonal pattern, similar to that of the external environment and unlike that at the deep of the cave. Humidity remained practically constant and close to saturation during most of the monitoring time, both at the cave entrance and at the cave deep. The graphs also show more measurement problems for the humidity data than for the temperature data. The break in the continuity of the graph lines shows that a record was not made by the *data logger* or that the *data logger* recorded, in the case of humidity, values of 0% or more than 100%. Additionally, the arrows indicate the occurrence of anomalous data, very different from what is normally recorded, which may represent *data logger* measurement errors. Again, the frequency of these errors is greater with humidity records than with temperature records.

Figure 4 shows the correlation between the temperature of the external (epigean) environment and the temperature of the internal (hypogean) environment for caves BRU_0005 and MDIR_0028. The graphs show the Pearson correlation (r) and p values, with p-values < 0.05 indicating a significant correlation ($p > 0.05$ indicate not significant). The higher the "r" value, the greater the influence of the temperature of the external environment on the temperature of the cave. Graph "a" shows the correlation between the temperature of the external environment and the temperature at the entrance of cave BRU_0005 (see previous figure 3 for more details on the temporal dynamics of temperature in both environments). In this case, the correlation is positive, significant and high (63%), showing that the climate of the external environment is influencing the climate of the cave entrance with almost no delay. This pattern is commonly found at the entrance to caves, or in smaller caves

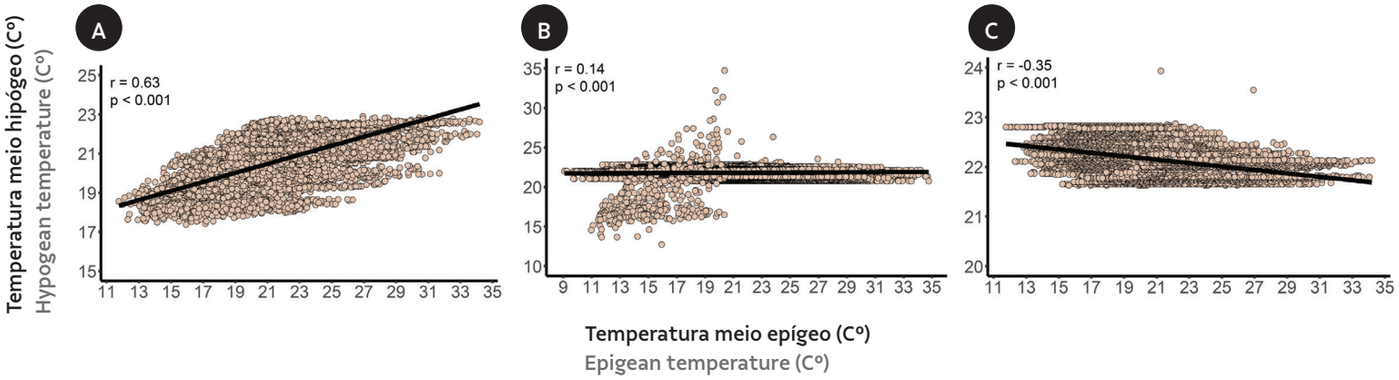


Figura 4: Correlação entre a temperatura do meio epígeo (externo) e temperatura do meio hipógeo (caverna). Nos gráficos são apresentados os valores de correlação de Pearson (r) e de p. O "p" indica se a correlação foi significativa ou não. Valores de p < 0,05 mostram que a correlação foi significativa, e de p > 0,05, que não foi significativa. Quanto maior o valor de "r", maior a influência da temperatura do meio externo sobre a temperatura da cavidade. Fonte: Spelayon, 2023.

Figure 4: Correlation between the temperature of the epigeal (external) environment and the temperature of the hypogeal (cave) environment. The graphs show Pearson correlation (r) and p values, with p-values < 0.05 indicating a significant correlation (p > 0.05 indicate not significant). The higher the "r" value, the greater the influence of the temperature of the external environment on the temperature of the cave. Source: Spelayon, 2023.

maior superfície de contato com o meio externo. No gráfico "b" temos a correlação entre a temperatura do meio externo e a temperatura do fundo caverna MDIR_0028. Neste caso temos uma correlação positiva, significativa, porém baixa (apenas 14%). Isso mostra que existe um atraso na influência do clima do meio externo sobre o clima do fundo da caverna. No gráfico "c" temos a correlação entre a temperatura do meio externo com a temperatura do fundo da cavidade BRU_0005 (ver figura anterior – Figura 3 – para maiores detalhes sobre a dinâmica temporal da temperatura em ambos os habitats). Neste caso temos uma correlação negativa, moderada e significativa (-35%), mostrando que existe um atraso ainda maior na influência do clima do meio externo sobre a temperatura da caverna.

1.1 A importância do clima para o ecossistema cavernícola

Todas estas condições climáticas peculiares são essenciais para manter a estabilidade e funcionamento do ecossistema cavernícola, exercendo importante influência na fauna subterrânea e nos processos biogeoquímicos que acontecem no meio hipógeo. Vários estudos já mostraram que o clima é um dos principais fatores capazes de determinar a diversidade de espécies em ecossistemas cavernícolas. Ou seja, as características climáticas, juntamente com outras variáveis (e.g. recursos tróficos, heterogeneidade de habitats, presença de água, características da paisagem do entorno das cavernas),

that have a larger surface area in contact with the external environment. Graph "b" shows the correlation between the temperature of the external environment and the temperature of the deep of cave MDIR_0028. In this case, the correlation is positive and significant, but low (only 14%). This indicates a delay in the influence of the climate of the external environment on the climate of the cave deep. Graph "c" shows the correlation between the temperature of the external environment and the temperature of the deep of cave BRU_0005 (see previous figure 3 for more details on the temporal dynamics of temperature in both *habitats*). In this case, the correlation is negative, significant and moderate (-35%), indicating an even greater delay in the influence of the climate of the external environment on the temperature of the cave deep zone.

1.1 The importance of climate for the cave ecosystem

All of these peculiar climatic conditions are essential to maintaining the stability and functioning of the cave ecosystem, as they exert an important influence on the subterranean fauna and the biogeochemical processes that occur in the hypogeal environment. Several studies have shown that climate is one of the main factors capable of determining species diversity in cave ecosystems. In other words, climatic characteristics, together with other variables (e.g., trophic resources, habitat

podem ditar quais cavernas apresentarão maior ou menor biodiversidade (e.g. Cardoso; Ferreira; Souza-Silva, 2019; Deharveng *et al.,* 2024; Jaffé *et al.*, 2016, 2018; Lunghi; Manenti; Ficetola, 2014; Melo; Ferreira; Souza-Silva, 2025; Rabelo; Souza-Silva; Ferreira, 2020; Trevelin *et al.*, 2021). Além desta influência acontecer em escala espacial, ela também acontece em escala temporal. Muitas cavernas, por exemplo, apresentam maior biodiversidade durante a estação chuvosa em relação a estação seca, devido às diferenças climáticas entre as estações (Bento *et al.,* 2016; Ferreira *et al.*, 2015; Lunghi; Manenti; Ficetola, 2017).

Além disso, a estabilidade climática nas cavernas impõe forte pressão seletiva para os organismos que vivem no ambiente subterrâneo (Mammola *et al.,* 2019; Pallarés *et al.,* 2019, 2020). Por exemplo, algumas espécies podem exibir diferentes níveis de tolerância às variações microclimáticas ao longo de uma caverna. Mammola e Isaia (2014) mostraram que diferenças na temperatura dentro de uma caverna pode gerar separação de nichos de espécies de aranhas potencialmente competidoras. Além da temperatura, a umidade relativa do ar também pode ser um fator limitante, já que muitas espécies de invertebrados cavernícolas, especialmente as troglóbias, apresentam baixa resistência a perda de água para o ambiente por exibir alta permeabilidade cuticular (Mammola *et al.,* 2019; Pallarés *et al.,* 2019, 2020). Adicionalmente, os ciclos termais diários encontrados em algumas cavernas podem controlar o ritmo circadiano dos organismos subterrâneos (Mammola *et al.,* 2019; Medina *et al.,* 2023; Souza, Souza-Silva, Ferreira, 2024). Finalmente, as cavernas também podem ainda servir como um refúgio para as espécies que vivem no meio externo durante eventos climáticos extremos, estação climáticas adversas, ou até mesmo em decorrência da perda de habitat e degradação da paisagem do entorno. Isto ocorre devido efeito de amortecimento das condições climáticas que as cavernas propiciam (Barret *et al.,* 2004; Fraga *et al.*, 2023; Mammola *et al.,* 2019; Medina *et al.,* 2023; Novak *et al.,* 2004).

Vale mencionar ainda, que a fauna também pode alterar as condições do clima das cavernas. Cavernas que abrigam grandes congregações de morcegos, são denominadas como *bat caves* e/ou *hot caves* (Ladle *et al.*, 2012). Nas *bat caves*, as temperaturas médias podem ser superiores à média anual externa chegando a ultrapassar os 40º (Juberthie, 2000; Rodríguez-Durán,1998). Estas elevadas temperaturas são resultado do calor gerado pela presença de colônias compostas por milhares de morcegos e pela decomposição do guano por eles depositado (Peck *et al.*, 1998). Congregações mais expressivas em tamanho podem ainda alterar as taxas de dióxido de carbono (CO_2), acelerando assim o processo

heterogeneity, water presence, characteristics of the landscape surrounding caves), can dictate which caves will present greater or lesser biodiversity (e.g., Cardoso; Ferreira; Souza-Silva, 2019; Deharveng *et al.*, 2024; Jaffé *et al.*, 2016, 2018; Lunghi; Manenti; Ficetola, 2014; Melo; Ferreira; Souza-Silva, 2025; Rabelo; Souza-Silva; Ferreira, 2020; Trevelin *et al.*, 2021). In addition to this influence occurring on a spatial scale, it also occurs on a temporal scale. Many caves have greater biodiversity during the rainy season, compared to the dry season, due to the climatic differences between the seasons (Bento *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2015; Lunghi; Manenti; Ficetola, 2017).

Furthermore, climatic stability in caves imposes a strong selective pressure on organisms living in the subterranean environment (Mammola *et al.*, 2019; Pallarés *et al.*, 2019, 2020). For example, some species may exhibit different levels of tolerance to microclimatic variation throughout a cave. Mammola and Isaia (2014) showed that differences in temperature within a cave can generate niche separation of potentially competing spider species. In addition to temperature, relative humidity can also be a limiting factor, since many species of cave invertebrates, especially troglobites, have low resistance to water loss to the environment due to high cuticular permeability (Mammola *et al.*, 2019; Pallarés *et al.*, 2019, 2020). Additionally, the daily thermal cycles found in some caves can control the circadian rhythm of subterranean organisms (Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Souza, Souza-Silva, Ferreira, 2024). Finally, caves can also serve as refugia for species living in the external environment during extreme weather events or adverse weather seasons, or even due to habitat loss and degradation of the surrounding landscape. This occurs because of the buffering effect caves provide on climatic conditions (Barret *et al.*, 2004; Fraga *et al.*, 2023; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Novak *et al.*, 2004).

It is worth mentioning that fauna can also alter the climatic conditions of caves. Caves that house large congregations of bats, called bat caves and/or hot caves (Ladle *et al.*, 2012), can have higher average temperatures than the external annual average, reaching over 40°C (Juberthie, 2000; Rodríguez-Durán, 1998). These high temperatures are the result of the heat generated by the presence of colonies composed of thousands of bats and the decomposition of the guano they deposit (Peck *et al.*, 1998). Larger congregations can also alter carbon dioxide (CO_2) levels, thus accelerating the process of bedrock dissolution

de dissolução da rocha matriz ou a gênese de espeleotemas (Lundberg; Mcfarlane, 2009). No Brasil, *bat caves* são conhecidas principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país, algumas das quais inseridas na formação ferrífera em regiões da Amazônia brasileira (Rocha, 2013; Vargas-Mena *et al.*, 2018; Otálora-Ardila *et al.*, 2019; Pimentel *et al.*, 2022, Piló *et al.*, 2023).

Em relação aos processos biogeoquímicos, o clima apresenta influência na gênese de condutos e espeleotemas. Alterações nas taxas de concentração de CO_2 provocadas por atividades antrópicas, podem mudar a dinâmica de precipitação dos espeleotemas em cavernas carbonáticas por exemplo (Czuppon *et al.*, 2021). Além disso, a estabilidade climática auxilia a conservar registros paleontológicos, arqueológicos e culturais, tais como pinturas nas paredes das cavernas ou mesmo permitem a reconstituição do paleoclima (Gomes *et al.*, 2021a).

Por estes motivos, a manutenção das condições climáticas do ambiente cavernícola é de extrema importância. No entanto, devido à forte relação que existe entre o clima do meio epígeo e hipógeo, é de se esperar que as alterações climáticas que acontecem no meio externo desencadeiem mudanças no meio subterrâneo. Modelos teóricos e estudos de modelagem comparativa já mostraram que o aumento da temperatura na superfície irá gerar um aumento na temperatura das cavernas (Badino, 2004, 2010; Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Wind *et al.*, 2022). Além disso, alterações antrópicas nos ecossistemas do entorno das cavernas decorrentes do avanço de atividades agrícolas, de áreas urbanas, atividades de mineração, entre outras, podem mudar as condições microclimáticas do meio subterrâneo por alterar o fluxo de ar, a temperatura e retenção de água do meio externo (Fraga *et al.*, 2023; Gomes *et al.*, 2019; Prous; Ferreira; Jacobi, 2015). Além dos impactos indiretos, o clima das cavernas também pode ser alterado por impactos diretos, decorrentes das atividades de turismo, por exemplo. O turismo em cavernas pode gerar: 1) mudanças na circulação natural de ar, através da abertura de entradas artificiais e mudanças na geometria das passagens; 2) mudanças na temperatura das cavernas, através do aquecimento local provocado por luzes elétricas e pelo fluxo de visitantes; 3) mudanças na concentração de CO_2 do ar, pela presença de visitantes, acúmulo de matéria orgânica em decomposição (lixo orgânico), entre outros (Constantin *et al.*, 2021; Freitas, 2010; Lobo, 2012; Lobo; Zago, 2010). Todas estas alterações climáticas antropogênicas são capazes de ameaçar a biota subterrânea e os serviços ecossistêmicos promovidos por estes ambientes.

or the genesis of speleothems (Lundberg; Mcfarlane, 2009). Bat caves are known mainly in the North and Northeast regions of Brazil, some of which are inserted in ferriferous formations in regions of the Brazilian Amazon (Rocha, 2013; Vargas-Mena *et al.*, 2018; Otálora-Ardila *et al.*, 2019; Pimentel *et al.*, 2022, Piló *et al.*, 2023).

Climate also influences biogeochemical processes, such as the genesis of conduits and speleothems. For example, changes in CO_2 concentration caused by human activities can change the precipitation dynamics of speleothems in carbonate caves (Czuppon *et al.*, 2021). In addition, climatic stability helps in the conservation of paleontological, archaeological and cultural records, such as paintings on cave walls, and may even allow paleoclimate reconstruction (Gomes *et al.*, 2021a).

For these reasons, maintaining the climatic conditions of cave environments is extremely important. However, due to the strong relationship that exists between the climates of the epigean and hypogean environments, climatic changes that occur in the external environment can be expected to trigger changes in the subterranean environment. Theoretical models and comparative modeling studies have already shown that an increase in surface temperature will generate an increase in cave temperature (Badino, 2004, 2010; Dominguez-Villar *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2019; Medina *et al.*, 2023; Wind *et al.*, 2022). Furthermore, anthropogenic changes in the ecosystems surrounding caves, resulting from the advancement of agricultural activities, urban areas and mining activities, among others, can change the microclimatic conditions of the subterranean environment by altering air flow, temperature and water retention of the external environment (Fraga *et al.*, 2023; Gomes *et al.*, 2019; Prous; Ferreira; Jacobi, 2015). In addition to indirect impacts, the climate of caves can also be altered by direct impacts, such as tourism activities. Cave tourism can generate: 1) changes in natural air circulation, through the opening of artificial entrances and changes in the geometry of passages; 2) changes in cave temperature, through local heating caused by electric lights and the flow of visitors; and 3) changes in CO_2 concentration in the air, due to the presence of visitors and the accumulation of decomposing organic matter (organic waste), among others (Constantin *et al.*, 2021; Freitas, 2010; Lobo, 2012; Lobo; Zago, 2010). All these anthropogenic climatic changes can threaten the subterranean biota and the ecosystem services promoted by these environments.

As espécies cavernícolas, por viverem em um ambiente climaticamente estável, são geralmente consideradas estenotérmicas (não toleram grandes variações térmicas em seu ambiente) e, por este motivo, podem ser altamente sensíveis a pequenas mudanças microclimáticas (Mammola *et al.*, 2019; Pallarés *et al.*, 2019, 2020). Para certas espécies uma variação de apenas 2°C (para mais ou para menos) pode ser suficiente para causar grandes declínios populacionais (Mammola *et al.*, 2019). Mammola, Goodacre e Isaia (2018) mostraram através de modelagem de nichos uma redução potencial da adequabilidade de habitats subterrâneos frente as mudanças climáticas globais podendo causar a extinção de muitas espécies de aranhas endêmicas de ambientes cavernícolas. Uma meta-análise global recente mostrou, inclusive, que as mudanças climáticas dos ecossistemas subterrâneos são capazes de afetar diferentes níveis biológicos, gerando respostas a nível de gene até a mudanças na estrutura e dinâmica das comunidades (Vaccareli *et al.*, 2023).

1.2 O monitoramento climático em cavernas

Uma das formas de avaliar se os ecossistemas cavernícolas estão sofrendo mudanças climáticas e identificar quais fatores estão sendo determinantes para gerar estas alterações no clima é através de estudos de monitoramento. O monitoramento climático nada mais é do que a medição de uma ou mais variáveis climáticas (e.g. temperatura e umidade) em um determinado sistema ao longo do tempo (Yoccoz; Nichols; Boulinier, 2001). Com estas informações em mãos é possível identificar o que, onde, quando e quanto de mudança está acontecendo, avaliar quais são as causas destas mudanças, para então desenvolver estratégias de manejo que irão mitigar seus efeitos negativos potenciais. Desta forma, é possível tomar decisões cientificamente baseadas em dados reais com a finalidade de antecipar problemas, planejar ações de prevenção ou mitigação de impactos, avaliar a eficácia destas ações e propor estratégias de manejo e conservação de ecossistemas cavernícolas (Cruz; Piló, 2019; Sparrow *et al.*, 2020).

Um dos diferentes tipos de monitoramentos em cavernas que se tem mais conhecimento atualmente é o climático. O estudo sobre o clima das cavernas brasileiras teve início em 1960, onde realizava-se medições pontuais da temperatura e umidade durante o mapeamento topográfico de cavernas (Gomes *et al.*, 2021b; Lobo, 2010). No Brasil, durante a década de 1970, o espeleólogo francês Guy-Christian Collet realizou a implantação do primeiro e, até o momento, único laboratório subterrâneo instalado no país. Este experimento foi construído

Cavernicolous species, because they live in a climatically stable environment, are generally considered stenothermic (not tolerant of large thermal variations in their environment) and, for this reason, can be highly sensitive to small microclimatic changes (Mammola *et al.*, 2019; Pallarés *et al.*, 2019, 2020). Variation of just 2°C (more or less) can be enough to cause large population declines for certain species (Mammola *et al.*, 2019). Through niche modeling, Mammola, Goodacre and Isaia (2018) showed a potential reduction in cave habitat suitability in the face of global climate change, which could cause the extinction of many spider species endemic to cave environments. A recent global meta-analysis even showed that climatic changes in subterranean ecosystems can affect different levels of biological organization, generating responses at the level of the gene and even changes in the structure and dynamics of communities (Vaccareli *et al.*, 2023).

1.2 Climatic monitoring in caves

One way to assess whether cave ecosystems are undergoing climate change and to identify the determining factors is through monitoring studies. Climate monitoring is nothing more than the measurement of one or more climatic variables (e.g., temperature and humidity) in a given system over time (Yoccoz; Nichols; Boulinier, 2001). This information makes it possible to: identify what, where, when and how much change is occurring; assess the causes of changes; and develop management strategies to mitigate their potential negative effects. In this way, it is possible to make scientific decisions based on real data to anticipate problems, plan actions to prevent or mitigate impacts, evaluate the effectiveness of these actions and propose strategies for managing and conserving cave ecosystems (Cruz; Piló, 2019; Sparrow *et al.*, 2020).

One of the most widely known types of cave monitoring is climate monitoring. Studies on the climate of Brazilian caves began in 1960, with specific measurements of temperature and humidity during topographic mapping of caves (Gomes *et al.*, 2021b; Lobo, 2010). During the 1970s, French speleologist Guy-Christian Collet implemented the first and, to date, only Brazilian subterranean laboratory. This experiment was built in the resurgence of the Sistema Areias (Gruta Laboratório), in

na ressurgência do Sistema Areias (Gruta Laboratório), no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) que, além de estudos biológicos sobre peixes, tinha o objetivo de realizar pesquisas sobre microclima e gênese de espeleotemas (Collet, 1985).

A partir de 1990 o monitoramento climático de cavernas no Brasil começou a ser implementado de forma mais sistemática (Gomes *et al.*, 2021b; Lobo, 2010). Um avanço nas pesquisas sobre este tema aconteceu no começo dos anos 2000, principalmente devido ao aparecimento de novas tecnologias e equipamentos mais avançados (e.g. *data loggers*), permitindo a obtenção de dados climáticos mais robustos e de forma contínua (Cigna, 2002a, b; Gomes *et al.*, 2021b, Lobo, 2010). Os primeiros estudos foram feitos principalmente para auxiliar a tomada de decisões sobre atividades turísticas e conservação de registros patrimoniais importantes (e.g. espeleotemas, pinturas rupestres). Atualmente, os programas de monitoramento também fazem parte das etapas dos projetos de licenciamento ambiental (Cruz; Piló, 2019; Lobo, 2010; Thurgate, 2004) e vêm sendo considerados uma das atividades centrais para garantir a conservação dos ecossistemas cavernícolas (Marsh; Trenham, 2008).

Nos projetos de licenciamento ambiental geralmente tem-se como objetivo compreender o efeito de diferentes atividades antrópicas (e.g. aumento na deposição de material particulado ou poeira, desmatamento, industrialização e urbanização na área de influência, alterações hidrológicas, entre outros) sobre os componentes bióticos e abióticos das cavernas. O estudo do clima em cavernas também é essencial para tirar conclusões sobre a fauna subterrânea, que dependem de condições climáticas estáveis (Cruz; Piló, 2019). Atualmente, nas cavernas associadas as formações ferríferas os principais estudos de monitoramento climático são realizados para atender as exigências do licenciamento ambiental e nenhum trabalho científico foi publicado até o momento. Deste modo, este capítulo baseou-se nos resultados e boas práticas desses programas de monitoramento, realizados nas regiões do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas gerais, e de Carajás, estado do Pará.

2 COMO MONITORAR?

2.1 Quais variáveis podem ser medidas?

Nos estudos que tem o objetivo de avaliar os efeitos das atividades turísticas em cavernas, diversos parâmetros climáticos têm sido tipicamente monitorados, tais como: temperatura e umidade relativa do ar, temperatura da água (se aplicável), concentração de CO_2 e de radônio (para avaliar a qualidade do ar),

the Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), which, in addition to biological studies on fish, aimed to conduct research on microclimate and speleothem genesis (Collet, 1985).

From 1990 onwards, climate monitoring of Brazilian caves began to be implemented more systematically (Gomes *et al.*, 2021b; Lobo, 2010). Research on this topic advanced in the early 2000s, mainly due to the emergence of new technologies and more advanced equipment (e.g., *data loggers*), allowing for the collection of more robust and continuous climatic data (Cigna, 2002a, b; Gomes *et al.*, 2021b, Lobo, 2010). The first studies were carried out mainly to assist decision-making regarding tourism activities and the conservation of important heritage records (e.g., speleothems, cave paintings). Currently, monitoring programs are also part of the stages of environmental licensing projects (Cruz; Piló, 2019; Lobo, 2010; Thurgate, 2004) and have been considered one of the central activities to ensure the conservation of cave ecosystems (Marsh; Trenham, 2008).

The general aim of environmental licensing projects is to understand the effects of different anthropogenic activities (e.g., increased deposition of particulate matter or dust, deforestation, industrialization and urbanization in the area of influence, and hydrological changes, among others) on the biotic and abiotic components of caves. Studying the climate of caves is also essential to drawing conclusions about subterranean fauna, which depends on stable climatic conditions (Cruz; Piló, 2019). Currently, the main climate monitoring studies in caves associated with ferriferous formations are carried out to meet the requirements of environmental licensing, and no scientific work has been published to date. Therefore, this chapter was based on the results and good practices of these monitoring programs, carried out in the regions of the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais, and Carajás, state of Pará.

2 HOW TO MONITOR?

2.1 What variables can be measured?

Studies that aim to evaluate the effects of tourist activities in caves have typically monitored several climatic parameters, such as air temperature and relative humidity, water temperature (if applicable), CO_2 and radon concentrations (to assess air quality),

fluxo de ar (direção e velocidade) e os processos de condensação/evaporação (Cigna, 2002a, 2002b; Freitas, 2010; Gomes *et al.*, 2021a; Lario; Soler, 2010; Lobo, 2012; Lobo; Lorenção, 2014; Lobo; Boggiani; Perinotto, 2015). No entanto, nos estudos de licenciamento ambiental de cavernas associadas as formações ferríferas, geralmente se monitora apenas a temperatura e umidade relativa do ar, apesar de elevados níveis de radônio já terem sido observados em cavernas inseridas na Serra do Gandarela no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, por exemplo (Silva *et al.*, 2022). Por este motivo, o presente capítulo irá focar principalmente nos métodos que envolvem o monitoramento destas duas variáveis.

A escolha dos parâmetros monitorados irá depender dos objetivos do monitoramento. Por exemplo, se o objetivo for avaliar se a integridade física e o equilíbrio ecológico de cavernas próximas a algum tipo de empreendimento, a escolha de uma única variável climática chave, juntamente com outras variáveis de fauna e/ou geológicas, pode ser suficiente para responder a sua pergunta. De acordo com Pipan *et al.* (2011) a temperatura é um destes fatores chave para investigar a saúde e as mudanças nos sistemas subterrâneos, principalmente porque alterações nesta variável podem causar efeitos em cascata no ecossistema cavernícola. Ou seja, a alteração desta variável pode gerar uma série de consequências que, por sua vez, geram outras alterações no ambiente. Por exemplo, alterações na temperatura do ambiente cavernícola podem resultar no abandono da caverna por uma colônia de morcegos, afetando o aporte de recursos tróficos e, consequentemente, a biodiversidade de invertebrados associados a este recurso. Desta forma, a temperatura pode ser usada como uma variável *proxy*[1] de uma série de outros parâmetros ambientais mais difíceis de se mensurar.

2.2 Qual equipamento usar para monitorar o clima cavernícola?

Atualmente, a temperatura e a umidade relativa do ar dos ambientes cavernícolas têm sido registradas com a utilização de termo-higrômetros com *data loggers*. Através da melhoria na acurácia e automação destes equipamentos, o avanço nos estudos climáticos tornou-se possível (Mejía-Ortiz *et al.*, 2020). O uso de *data loggers* para o monitoramento ambiental se tornou comum a partir dos anos 80, coincidindo com a explosão dos computadores (Allah *et al.*, 2017). O *data logger*

air flow (direction and speed) and condensation/evaporation processes (Cigna, 2002a, 2002b; Freitas, 2010; Gomes *et al.*, 2021a; Lario; Soler, 2010; Lobo, 2012; Lobo; Lorenção, 2014; Lobo; Boggiani; Perinotto, 2015). However, environmental licensing studies of caves associated with ferriferous formations have generally only monitored temperature and relative humidity, although high levels of radon have been observed in caves located in Serra do Gandarela in the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais, for example (Silva *et al.*, 2022). For this reason, this chapter will focus mainly on the methods that involve monitoring these two variables.

The choice of parameters to be monitored will depend on the objectives of the monitoring. If the objective is to assess the physical integrity and ecological balance of caves near some type of industrial activities, the choice of a single key climate variable, together with other faunal and/or geological variables, may be sufficient. According to Pipan *et al.* (2011), temperature is one of the key factors for investigating the health of and changes in subterranean systems, mainly because changes in this variable can cause cascading effects on the cave ecosystem. In other words, changes in temperature can generate a series of consequences that, in turn, generate other changes in the environment. For example, changes in the temperature of the environment of a cave can result in its abandonment by a colony of bats, affecting the supply of trophic resources and, consequently, the biodiversity of invertebrates associated with this resource. Thus, temperature can be used as a proxy[1] variable for a series of other environmental parameters that are more difficult to measure.

2.2 What equipment should be used to monitor cave climate?

The temperature and relative humidity of cave environments have been recorded using thermo-hygrometers with *data loggers*. Improvements in the accuracy and automation of these devices have made advances in climate studies possible (Mejía-Ortiz *et al.*, 2020). The use of *data loggers* for environmental monitoring became common in the 1980s, coinciding with the growth in the use of computers (Allah *et al.*, 2017). The *data*

1 Uma variável "proxy" é utilizada como substituto de uma variável de interesse que é difícil ou impossível de medir diretamente. Está altamente correlacionada com a variável que se pretende medir, capturando a sua essência.
1 A 'proxy' variable is used as a substitute for a variable of interest that is difficult or impossible to measure directly. It is highly correlated with the variable it is intended to measure, capturing its essence.

é um dispositivo eletrônico que pode registrar através de um sensor interno ou externo uma série de parâmetros ambientais ao longo do tempo, tais como: temperatura, umidade relativa, direção e velocidade dos ventos, intensidade de luz, nível de água e qualidade da água, entre outros (Allah *et al.*, 2017; Waghmare; Chatur, 2012). *Data loggers* são equipamentos alimentados por bateria, geralmente compactos, de relativo baixo custo, que facilitam a obtenção e armazenamento de um grande volume de dados, podendo fazer registros por vários dias, meses e até anos, sendo a transferência destes dados realizada via cabo, *bluetooth*, rádio ou usb (Universal Serial Bus) (Cunha, 2015). O uso destes dispositivos permite ainda a padronização da coleta dos dados climáticos, o que resulta na obtenção de dados de melhor qualidade, reduzindo a ocorrência de erros ou interferências no momento da medição (Cunha, 2015) (Figura 6; Figura 7).

2.3 A escolha do *data logger* e a necessidade de testes prévios

Uma etapa fundamental em qualquer programa de monitoramento climático é a escolha do equipamento mais apropriado para a condição do seu local de estudo. Equipamentos inapropriados podem fornecer dados de baixa qualidade, com maior quantidade de erros, além de apresentarem problemas de funcionamento com mais facilidade (WMO, 2008). É essencial que os *data loggers* façam registros acurados e confiáveis por um longo período, principalmente se forem instalados em áreas remotas, evitando assim a perda de dados e recursos financeiros, bem como a redução da exposição das pessoas aos riscos existentes nos trabalhos de campo. Por isso, é necessário que eles tenham bateria de longa duração e grande capacidade de armazenamento de dados. Além disso, os dispositivos precisam ser resistentes, já que estarão expostos a condições ambientais e climáticas mais severas (Dunham *et al.*, 2005), bem como a danos causados por animais, especialmente roedores e micro-organismos (Figura 5).

É importante salientar, que, a maioria dos *data loggers* disponíveis no mercado não foram desenvolvidos especificamente para lidar com as condições ambientais dos ecossistemas cavernícolas, com umidade relativa próxima a saturação (Mejía-Ortiz *et al.*, 2021). Esta alta umidade pode facilmente danificar os dispositivos ou até mesmo gerar resultados errôneos devido a condensação que acontece sobre o sensor (Cigna, 2002a). Por este motivo algumas marcas de *data loggers* já foram testadas em estudos de monitoramentos em cavernas, e atualmente se sabe que poucas marcas são

logger is an electronic device that can record, through an internal or external sensor, a series of environmental parameters over time, such as: temperature, relative humidity, wind direction and speed, light intensity, and water level and quality, among others (Allah *et al.*, 2017; Waghmare; Chatur, 2012). *Data loggers* are battery-powered devices that are generally compact and of relatively low cost. They facilitate the collection and storage of a large volume of data, and can record data for several days, months and even years. Data can be transferred via cable, *Bluetooth*, radio or *USB* (Universal Serial Bus) (Cunha, 2015). The use of these devices also allows for the standardization of climate data collection, which results in better-quality data and reduces the occurrence of errors or interference at the time of measurement (Cunha, 2015) (Figure 6; Figure 7).

2.3 Choosing a *data logger* and the need for prior testing

A fundamental step of any climate monitoring program is choosing the most appropriate equipment for the conditions of the study site. Inappropriate equipment can provide low-quality data, with a greater number of errors, and is more likely to malfunction (WMO, 2008). It is essential that *data loggers* make accurate and reliable records over a long period of time, especially if they are installed in remote areas, thus avoiding the loss of data and financial resources, while also reducing the exposure of personnel to risks that exist during fieldwork. Therefore, they must have a long-lasting battery and a large data storage capacity. In addition, the devices need to be resistant, since they will be exposed to more severe environmental and climatic conditions (Dunham *et al.*, 2005), as well as to animals, especially rodents and microorganisms, that can potentially damage them, (Figure 5).

It is important to note that most *data loggers* available on the market are not specifically developed to deal with the environmental conditions of cave ecosystems, with relative humidity close to saturation (Mejía-Ortiz *et al.*, 2021). High humidity can easily damage the devices or even generate erroneous results due to condensation on the sensor (Cigna, 2002a). For this reason, some brands of *data loggers* have already been tested in cave monitoring studies, a few of which are truly resistant and produce more reliable measurements in this type

realmente resistentes e produzem medições mais confiáveis neste tipo de ambiente. Sendo assim, antes de se iniciar um programa de monitoramento climático, é recomendável que se busque na literatura científica por equipamentos já utilizados com eficiência, ou se realize testes e comparações prévias.

Mesmo assim, apesar da qualidade observada em algumas marcas de *data loggers*, eles ainda exibem muitos problemas com a medição da umidade relativa do ar nos ambientes cavernícolas. Por este motivo, existem frequentes falhas na medição da umidade, gerando uma grande quantidade de dados faltantes (ver Figura 3). Diferentemente, as medições de temperatura mostram-se sempre mais confiáveis. Desta forma, atualmente, muitos estudos têm utilizado apenas os dados de temperatura no monitoramento climático, devido ao maior nível de confiabilidade, o que não acontece com a umidade (Bioespeleo, 2022). No entanto, vale ressaltar que em outros países, existem equipamentos muito robustos e já utilizados em monitoramentos de cavernas, capazes de funcionar por longos períodos, resistentes a água e baixas temperaturas (gelo) ou que podem ser enterrados no solo, mas que ainda não foram testados no Brasil.

of environment. Therefore, before starting a climate monitoring program, it is recommended that the scientific literature be searched for equipment that has already been used in this way efficiently, or test and compare equipment prior to use.

Even so, despite the quality observed for some brands of *data loggers*, they still can exhibit many problems with measuring relative humidity in cave environments, such as frequent failures in humidity measurements that generate a large amount of missing data (see Figure 3). In contrast, temperature measurements have always proven to be more reliable. Due to this higher level of reliability, compared to humidity, many studies currently use only temperature data in climate monitoring (Bioespeleo, 2022). However, it is worth mentioning that very robust equipment that is capable of operating for long periods and is resistant to water and low temperatures (ice), or can be buried in the ground, is already being used for cave monitoring in other countries, but has not yet been tested in Brazil.

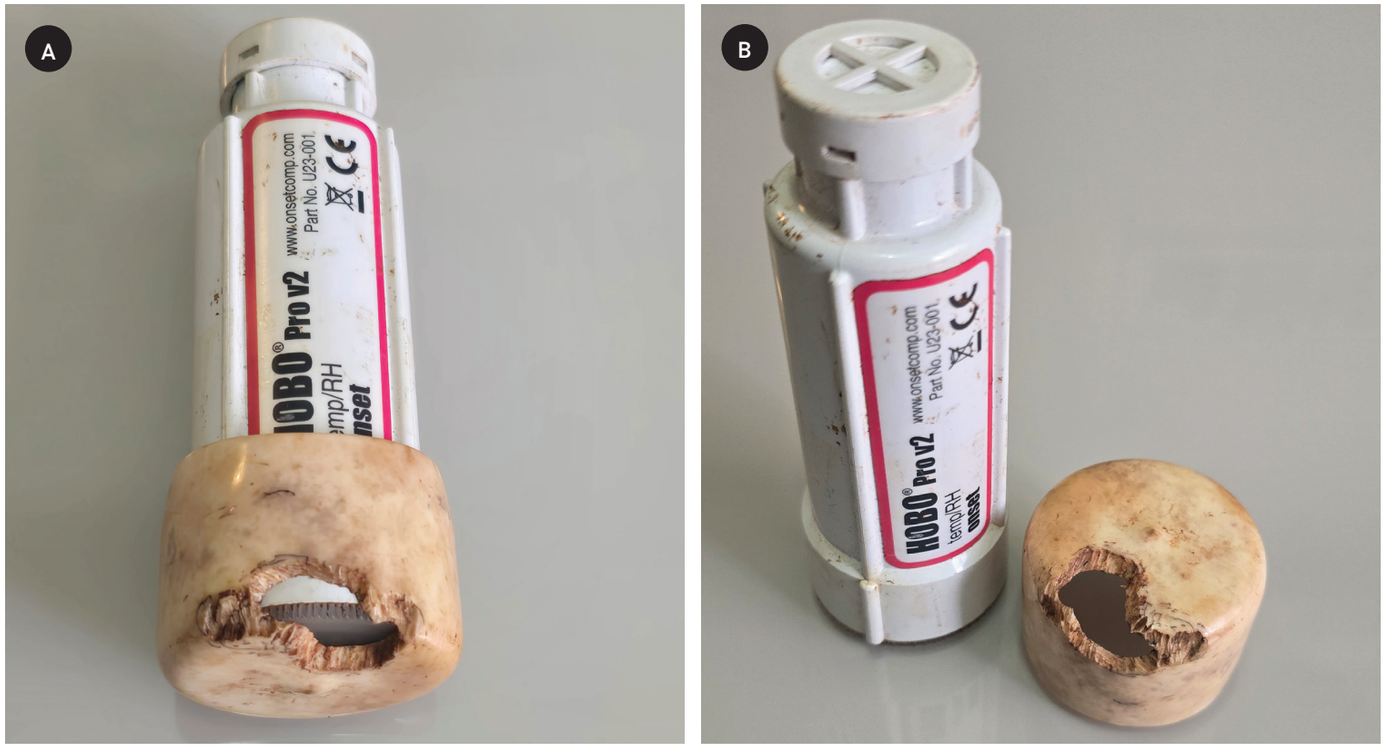


Figura 5. *Data logger* danificado por roedores. Foto: Carlos Frederico de Souza Lott.
Figure 5: *Data logger* damaged by rodents. Photo: Carlos Frederico de Souza Lott.

2.4 O desenho amostral

Após a escolha do equipamento mais apropriado, a definição dos locais de instalação do *data logger* no interior do ambiente cavernícola é outra etapa importante do processo, e vai depender do objetivo do estudo. Por exemplo, em muitas pesquisas que buscam avaliar os impactos do turismo no clima das cavernas, os equipamentos são instalados em locais onde há fluxo de turistas e onde não há, permitindo assim a comparação entre estes dois ambientes (Gomes *et al.*, 2021a, 2021b; Lobo; Lourenção, 2014; Lobo; Zago, 2010). Quando se pretende caracterizar o clima ao longo de uma caverna em específico, os equipamentos precisam ser distribuídos nas diferentes zonas de luminosidade, a fim de coletar dados climáticos desde a entrada até sua parte mais distal (Gomes *et al.*, 2021b). Em monitoramentos climáticos realizados para atender as exigências do licenciamento ambiental, onde se busca avaliar se o empreendimento nas adjacências está causando impactos no clima, a instalação de um *data logger* no fundo da caverna, local mais isolado das flutuações climáticas do ambiente externo, e de outro no meio externo, de forma geral é suficiente para obter as respostas necessárias. Caso o número de cavernas que compreenda o estudo seja pequeno e o orçamento disponível comporte a compra de um maior número de equipamentos, é também interessante instalar *data loggers* na entrada da caverna (logo após a linha d'água ou do plano de fechamento da poligonal da entrada) e em regiões intermediárias, além do fundo (parte mais distal) da caverna. A obtenção dos dados climáticos do meio externo é extremamente importante para se ter um controle no experimento. É necessário saber se as condições climáticas no interior das cavernas estão sendo conservadas frente a eventuais alterações que venham a ocorrer no ambiente epígeo. Nem sempre é necessário instalar um *data logger* no meio externo por caverna monitorada. Se as cavernas estiverem espacialmente próximas é possível utilizar no estudo os dados de apenas um *data logger* instalado na área de influência em comum deste conjunto de cavernas.

2.5 Instalação do *data logger* em campo e coleta dos dados

Antes da instalação, os equipamentos precisam ser calibrados e configurados, sendo este um primeiro passo para garantir a validade e qualidade dos dados coletados (Cunha, 2015; WMO, 2008). A calibração é uma prática essencial para verificar se o aparelho está funcionando adequadamente (Dunham *et al.*, 2005). Já, na configuração, se faz a escolha de quais variáveis

2.4 Sample design

After choosing the most appropriate equipment, defining the locations for installing *data loggers* inside the cave environment is another important step in the process and will depend on the objective of the study. Many studies that seek to evaluate the impacts of tourism on cave climate install the equipment in places where there is and there is not tourist flow, thus allowing comparisons to be made between the two environments (Gomes *et al.*, 2021a, 2021b; Lobo; Lourenção, 2014; Lobo; Zago, 2010). When the aim is to characterize the climate throughout a specific cave, the equipment needs to be distributed across the different light zones in order to collect climate data from the entrance to its most distal part (Gomes *et al.*, 2021b). For climate monitoring to meet environmental licensing requirements, which seeks to assess whether a industrial activity in the surrounding area is impacting the cave climate, installing a data logger deep inside the cave, a location that is most isolated from the climate fluctuations of the external environment, and another in the external environment, is generally sufficient to obtain the necessary answers. If the number of caves covered by a study is small, and the available budget allows for the purchase of a greater amount of equipment, it is also informative to install *data loggers* at the cave entrance (just after the waterline or the closing plane of the entrance polygon) and in intermediate regions, in addition to the deep (most distal part) of the cave. Obtaining climate data from the external environment is extremely important to have control over the experiment. It is necessary to know whether the climate conditions inside a cave are being preserved in the face of possible changes that may occur in the epigean environment. It is not always necessary to install a *data logger* in the external environment of each monitored cave, since with spatially close caves it is possible to use data from just one *data logger* installed in the common area of influence of the set of caves in the study.

2.5 *Data logger* installation in the field and data collection

Before installation, the equipment needs to be calibrated and configured, which is the first step to ensure the validity and quality of the collected data (Cunha, 2015; WMO, 2008). Calibration is an essential practice to verify that the device is working properly (Dunham *et al.*, 2005). Configuration involves choosing the variables to be measured, the type of scale to be

serão mensuradas, tipo de escala (e.g. Celsius, Fahrenheit ou Kelvin), os intervalos de tempo em que as aferições serão realizadas, assim como as horas e minutagens das aferições. Alguns equipamentos também oferecem configurações para a escolha do sistema de data e hora e formatos dos arquivos de exportação. A maioria dos aparelhos podem ser programados para medir e registrar a temperatura e umidade em uma ampla variedade de intervalos de tempo. Intervalos maiores geralmente resultam em baixa resolução e maior potencial para obtenção de dados tendenciosos. Em intervalos de tempo menores é possível captar uma maior variação das condições climáticas ao longo de um dia por exemplo (Dunham *et al.,* 2005), no entanto, requerem equipamentos com capacidade de armazenamento de dados maiores, ou visitas mais frequentes a campo para a obtenção dos dados. Em grande parte dos estudos, o aparelho é configurado para realizar medições em intervalos de uma hora, com início na primeira hora cheia após a instalação, o que facilita posteriormente o tratamento dos dados em escritório. Algumas marcas de equipamentos, permitem a configuração dos dispositivos e a coleta dos dados via *bluetooth* por meio de um aplicativo instalado em um tablet ou smartphone, o que reduz as interferências ou danos resultantes da manipulação dos equipamentos. A calibração deve ser feita sempre durante as rotinas de manutenção dos *data loggers*, com o objetivo de confirmar as condições dos sensores (Figura 6; Figura 7).

Após definido o exato local de instalação dos *data loggers* nas cavidades, sua fixação deve ser feita com materiais que evitem a necessidade de fazer furos ou qualquer tipo de alteração física na estrutura da caverna. É possível utilizar, por exemplo, arame galvanizado, cabos de aço, abraçadeira de nylon e grampos de fixação a fim de aproveitar os orifícios naturalmente presentes na rocha das cavernas (Gomes *et al.,* 2021b). No entanto, é recomendável que sejam evitados materiais condutores de descargas elétricas (raios), especialmente em cavernas associadas a geossistemas ferruginosos, pois estas descargas podem resultar na perda de dados ou mesmo em danos ao equipamento.

Gomes *et al.* (2021b) indica que os equipamentos sejam instalados a uma altura média de 1,5 m acima do solo. Deve-se escolher ainda, locais onde os equipamentos fiquem mais protegidos do acesso de animais que possam danificá-los ou mesmo carregá-los, bem como evitar locais onde possa ocorrer fluxos hídricos (gotejamentos, corredeiras, chuveirinhos, etc.) intensos durante o período de chuvas. Para os *data loggers* instalados no meio externo é necessário usar uma proteção

used (e.g., Celsius, Fahrenheit or Kelvin), the time intervals at which measurements will be performed, as well as the hours and minutes of the measurements. Some equipment also offers settings for choosing the date and time system and export file formats. Most devices can be programmed to measure and record temperature and humidity over a wide variety of time intervals. Generally, longer intervals result in lower resolution and greater potential for obtaining biased data. Shorter intervals make it is possible to capture greater daily variation in weather conditions (Dunham *et al.*, 2005). However, shorter intervals also require equipment with greater data storage capacity or more frequent field visits to obtain data. Most studies configure devices to take measurements at hourly intervals, starting in the first full hour after installation, which makes it easier to process the data in the office later. Some brands of equipment allow the devices to be configured and the data to be collected via *Bluetooth*, using an application installed on a *tablet* or *smartphone*, which reduces interference or damage resulting from handling the equipment. Calibration should always be performed during *data logger* maintenance routines to confirm the condition of the sensors (Figure 6; Figure 7).

Once the exact locations for installing *data loggers* in caves has been defined, they should be fixed using materials that avoid the need to drill holes or make any type of physical alteration to the structure of the cave. For example, galvanized wire, steel cables, nylon clamp and fixing clamps can be used to take advantage of natural holes present in cave rock (Gomes *et al.*, 2021b). However, materials that conduct electrical discharges (lightning) should be avoided, especially in caves associated with rusty (ferruginous) systems, as discharges can result in data loss or even equipment damage.

Gomes *et al.* (2021b) recommend that equipment be installed at an average height of 1.5 meters above the ground. Locations should be chosen where the equipment is well protected from access by animals that could damage it or even carry it away, while also avoiding those where intense water flows (drips, rapids, showers, etc.) may occur during the rainy season. *Data loggers* installed outdoors need to be protected against the



Figura 6: Configuração, instalação, manutenção e coleta de dados dos *data loggers* instalados em cavernas ferríferas para o monitoramento climático. A) Configuração de *data logger* para aferição das condições microclimáticas nas cavidades; B) Instalação de *data logger* em região distal de cavidade; C) Manutenção de *data logger*; D) Coleta e visualização de dados via aplicativo *Hobo Mobile*. Fonte: Bioespeleo, 2024.
Figure 6: Configuration, installation, maintenance and data collection of *data loggers* installed in ferriferous caves for climate monitoring: A) configuration of *data logger* to measure microclimatic conditions in caves; B) installation of *data logger* in the distal region of a cave; C) maintenance of *data logger*; D) collection and visualization of data via *Hobo Mobile* application. Source: Bioespeleo, 2024.

contra os efeitos da radiação solar, assim como também para evitar danos decorrentes de chuvas ou danos materiais (e.g. galhos de árvores caindo em cima do aparelho, danos causados por animais) (Figura 5) (Cunha, 2015). No entanto, o abrigo de proteção para o *data logger* não pode alterar o microclima local (o abrigo deve ter a mesma temperatura e umidade que o ar do entorno), gerando, desta forma, interferência na medição das variáveis climáticas (Cunha, 2015). Atualmente existem diferentes modelos destes aparatos de proteção disponíveis no mercado (Figura 8).

effects of solar radiation and rain or material damage (e.g., falling tree branches, animal damage) (Figure 5) (Cunha, 2015). However, the protective shelter for a *data logger* cannot alter the local microclimate (the shelter must have the same temperature and humidity as the surrounding air), as this would generate interference in the measurement of climate variables (Cunha, 2015). There are different models of protective devices currently available on the market (Figure 8).



Figura 7: Termohigrômetro com *data logger*, cabo óptico e computador de campo. Foto: Robson de Almeida Zampaulo.
Figure 7: Thermo-hygrometer with *data logger*, optical cable and field computer. Photo: Robson de Almeida Zampaulo.



Figura 8: Modelo de aparato de proteção de *data loggers*. Foto: Carlos Frederico de Souza Lott.
Figure 8: Model of *data logger* protection apparatus. Photo: Carlos Frederico de Souza Lott.

A frequência de coleta dos dados do *data logger* vai depender da capacidade de armazenamento do aparelho e da necessidade de se fazer visitas à campo para realizar a sua manutenção. Lembrando, que durante as visitas para a coleta dos dados, se deve fazer a calibragem do aparelho e verificação dos níveis de carga das baterias para garantir que o mesmo seguirá funcionando adequadamente. Caso o aparelho tenha sido danificado, é necessário substituí-lo por outro. As visitas podem ser feitas, por exemplo, mensalmente, trimestralmente ou semestralmente. A maior frequência de visitas diminui a ocorrência de erros de medição do aparelho, que será inspecionado mais regularmente, por outro lado, gera custos ao projeto e aumenta a exposição das pessoas no campo e o fluxo de visitantes na caverna, o que também pode gerar impactos decorrentes do pisoteamento, por exemplo.

The frequency of *data logger* data collection will depend on the device's storage capacity and the need for field visits to perform maintenance. Remember that during data collection visits, the device must be calibrated and the battery charge levels checked to ensure that it continues to function properly. If the device has been damaged, it must be replaced with another one. Visits can be made monthly, quarterly or biannually. More frequent visits reduce the occurrence of measurement errors by the device, as it will be inspected more regularly. On the other hand, more frequent visits generate costs for the project and increases the exposure of personnel in the field and the flow of visitors to the cave, which can also generate impacts resulting from trampling, for example.

2.6 Tratamento dos dados

Assim que é feito o *download* dos dados do *data logger*, é importante verificar a qualidade destas informações e checar a existência de erros potenciais. É necessário inspecionar visualmente cada série temporal com o objetivo de encontrar medições, que sejam resultantes do mal funcionamento do aparelho, e fazer o tratamento das informações. Estas medições, precisam, desta forma, ser removidas do conjunto de dados. Geralmente, estes problemas são óbvios e podem ser identificados apenas através de inspeção visual (Dunham *et al.*, 2005). Por exemplo, nos dados de umidade relativa do ar é muito comum encontrar valores superiores a 100% e/ou valores inferiores a 20%, sendo que muitas vezes a umidade registrada é de 0% (ver Figura 3). Também é possível encontrar valores negativos e/ou tendências de diminuição ou aumento súbito das variáveis. Estes registros inválidos, que advém de erro de leitura pelos sensores dos equipamentos precisam ser removidos (ver Figura 3). Também devem ser desconsiderados os valores obtidos nos dias de instalação e aferição dos aparelhos em campo, uma vez que estas atividades geram rupturas/falhas na leitura dos dados. Além disso, o manuseio do aparelho e o fluxo de pessoas no interior da caverna também podem influenciar o clima e ocasionar registros errôneos para o monitoramento. Sendo assim, também é recomendável que a incursão e o tempo de permanência de outros espeleólogos responsáveis pela execução de diferentes programas de monitoramento sejam controladas e avaliadas durante o tratamento dos dados. Pode-se também padronizar os dados climáticos e considerar apenas aqueles com ciclos de 24 horas de medição, o que possibilita melhor visualização e interpretação dos resultados. No entanto, dias com 23 medições podem ser considerados após inclusão do valor faltante por meio da duplicação da informação do registro mais próximo.

2.7 Como apresentar os resultados obtidos?

Os resultados podem ser apresentados através de uma descrição geral do clima das cavernas e do meio externo. Esta etapa está relacionada ao cálculo de uma série de métricas capazes de descrever importantes elementos dos regimes de temperatura e umidade, tais como valores mínimo, máximo, média, amplitude e desvio padrão. A amplitude nada mais é do que a diferença entre os valores máximos e mínimos de temperatura e umidade em um determinado local durante um período de tempo. Já, o desvio padrão representa o quanto as variáveis climáticas oscilaram em torno da média, mostrando

2.6 Data processing

Once the data is *downloaded* from the *data logger*, it should be checked for potential errors and its quality verified. Each time series should be visually inspected to find measurements that are the result of device malfunction, which need to be removed from the data set for processing the informations. These problems are usually obvious yet can only be identified through visual inspection (Dunham *et al.*, 2005). It is very common with relative humidity data to find values greater than 100% and/or less than 20%, and the humidity recorded is often 0% (see Figure 3). It is also possible to find negative values and/or trends of sudden decrease or increase in variables. Invalid records, which result from reading errors by the equipment sensors, need to be removed (see Figure 3). Values obtained on the days of installation and calibration of the equipment in the field should also be disregarded, as these activities cause disruptions/failures in data reading. Furthermore, equipment handling and the flow of people inside a cave can influence the climate, resulting in erroneous monitoring records. Therefore, it is also recommended that incursions and the length of stay of other speleologists responsible for executing different monitoring programs be controlled and evaluated during data processing. It is also possible to standardize the climate data and consider only those with 24-hour measurement cycles, which allows for better visualization and interpretation of the results. However, days with 23 measurements can be considered after including the missing value by duplicating the information from the closest record.

2.7 How to present the obtained results?

The results can be presented through a general description of the cave climate and the external environment. This step involves the calculation of a series of metrics capable of describing important elements of the temperature and humidity regimes, such as minimum, maximum, average, amplitude and standard deviation values. The amplitude is nothing more than the difference between the maximum and minimum values of temperature or humidity at a given location during a given period. The standard deviation represents how much the climatic variables oscillated around the average, showing their variation over time. The calculation of these

a sua variação ao longo do tempo. O cálculo destas métricas é usual para qualquer estudo climático (e.g. Gomes *et al.*, 2021a, 2021b; Lobo; Lourenção, 2014; Lobo; Zago, 2010; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020, 2021; Wind *et al.*, 2002). Elementos gráficos são também fundamentais para que seja possível visualizar e comparar os padrões temporais das variáveis mensuradas entre as cavernas e o meio externo ver Figura 3; Figura 4; Figura 9; Figura 10).

Além da abordagem descritiva, também é essencial a realização de análises estatísticas para responder as perguntas relacionadas ao monitoramento. Por muito tempo os estudos climatológicos utilizaram uma abordagem puramente descritiva, consistindo primariamente em estimar a tendência central (e.g. média, mediana) e variabilidade (e.g. desvio padrão) dos dados ao longo do tempo (Storch; Zwiers, 2002). Apesar desta abordagem ainda ser importante para conhecer os padrões das variáveis coletadas, ela não serve para testar hipóteses e pode gerar conclusões tendenciosas, pois depende da interpretação do observador. Contudo, com o advento dos computadores passou-se a utilizar análises estatísticas, a fim de aprimorar

metrics is common for any climate study (e.g. Gomes *et al.*, 2021a, 2021b; Lobo; Lourenção, 2014; Lobo; Zago, 2010; Medina *et al.*, 2023; Mejía-Ortiz *et al.*, 2020, 2021; Wind *et al.*, 2002). Graphic elements are also essential to enable visualization and comparison of the temporal patterns of the measured variables between caves and the external environment (see Figure 3; Figure 4; Figure 9; Figure 10).

In addition to the descriptive approach, statistical analyses are also necessary to answer questions related to monitoring. For a long time, climatological studies used a purely descriptive approach, consisting primarily of estimating the central tendency (e.g. mean, median) and variability (e.g. standard deviation) of data over time (Storch; Zwiers, 2002). Although this approach is still important for understanding the patterns of the measured variables, it is not useful for testing hypotheses and can generate biased conclusions, as it depends on the observer's interpretation. However, the advent of computers has allowed the use of statistical analyses to improve the understanding of climate dynamics and better understand

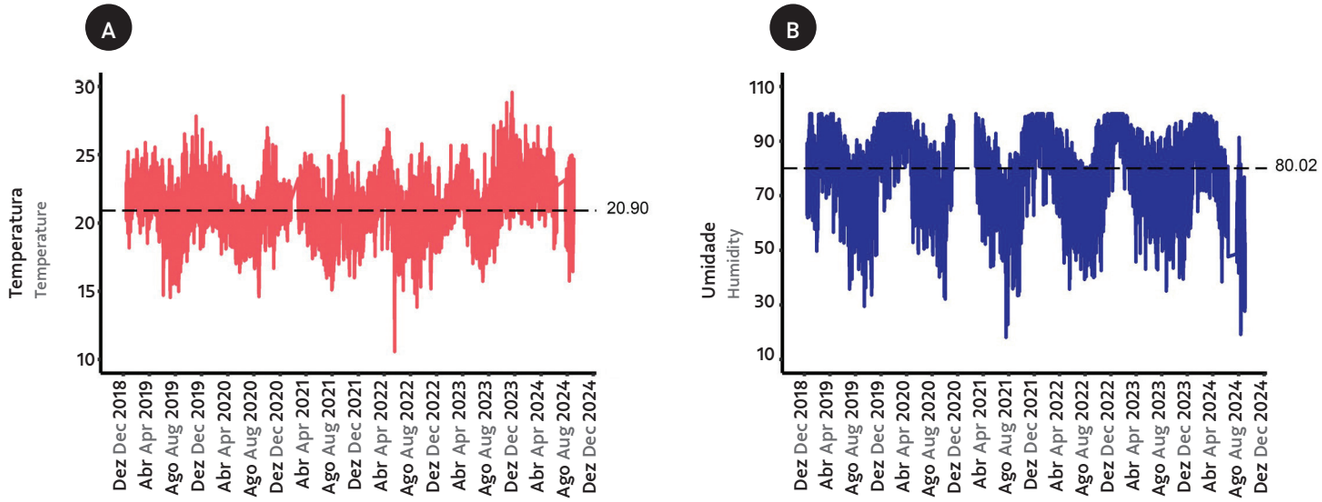


Figura 9: Exemplos de gráficos usados para visualizar os padrões temporais de temperatura e umidade de um monitoramento climático. Os dados horários de temperatura e umidade apresentados pertencem ao monitoramento climático da cavidade BRU_0014, realizado entre dezembro de 2018 e outubro de 2024, localizada na área de influência da Mina de Brucutu (Vale S.A.), município de São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. A linha tracejada preta dos gráficos mostra os valores médios de temperatura (a) e de umidade (b) registrados ao longo de todo o monitoramento. Fonte: Spelayon, 2024.

Figure 9: Examples of graphs used to visualize temporal patterns of temperature and humidity from a cave climate monitoring project. The presented hourly temperature and humidity data are from the climate monitoring project of cave BRU_0014, carried out between December 2018 and October 2024, located in the area of influence of the Brucutu Mine (Vale S.A.), in the municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. The black dashed line in the graphs shows the average temperature (a) and humidity (b) values recorded throughout the monitoring project. Source: Spelayon, 2024.

o entendimento sobre as dinâmicas climáticas e para melhor compreender quais os fatores são capazes de determinar estas variáveis. Assim, as análises estatísticas são atualmente consideradas uma ferramenta essencial para interpretar as informações advindas dos dados coletados durante a execução de uma pesquisa. Isso se torna ainda mais importante quando temos uma grande base de dados, como é o caso de um

which factors are capable of determining these variables. Thus, statistical analyses are currently considered an essential tool for interpreting information from data collected during the execution of a survey. This becomes even more important with large databases, as is the case with climate monitoring, where

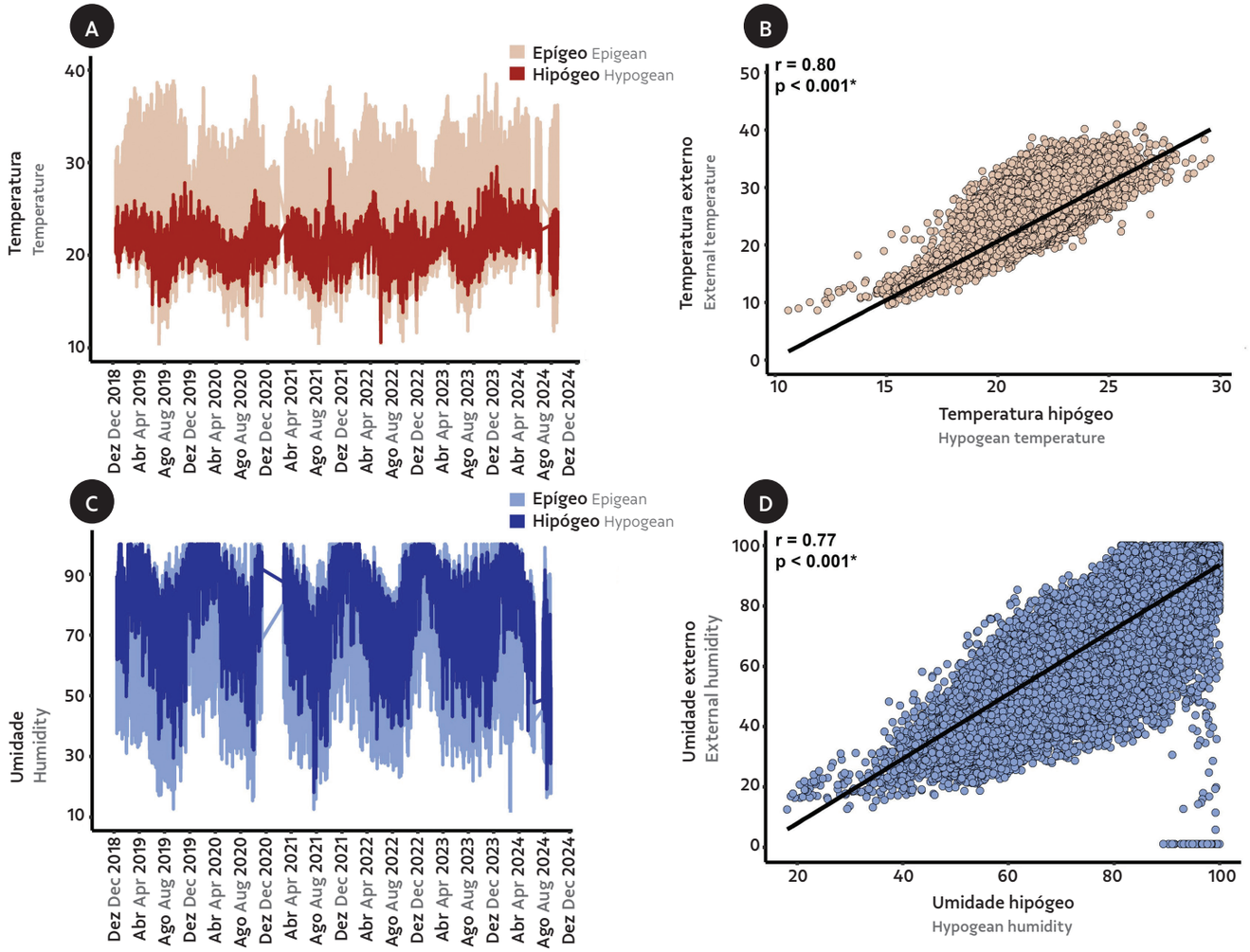


Figura 10: Exemplos de gráficos usados para comparar os padrões temporais de temperatura A) e umidade C) obtidos nas cavernas (hipógeo) e no meio externo (epígeo). Nos gráficos "A" e "C" são mostrados os valores horários de temperatura e umidade da cavidade BRU_0014 e seu meio externo. Nos gráficos "B" e "D" é apresentada a correlação entre a temperatura e umidade do meio epígeo com o hipógeo. Nos gráficos são exibidos os valores de correlação de Pearson (r) e de p. Fonte: Spelayon, 2024.

Figure 10: Examples of graphs used to compare the temporal patterns of temperature A) and humidity C) obtained in caves (hypogeal) and in the external environment (epigeal). Graphs "A" and "C" show the hourly values of temperature and humidity for the cave BRU_0014 and its external environment. Graphs "B" and "D" show the correlation between the temperature and humidity of the epigeal environment and that of the hypogeal environment. The graphs show Pearson correlation (r) and p values. Source: Spelayon, 2024.

monitoramento climático, onde as variáveis são medidas a cada hora por um longo período (Storch; Zwiers, 2002).

Dentro de um monitoramento ambiental precisamos responder questões importantes, que são difíceis de serem respondidas sem análises estatísticas apropriadas, ou somente com uma abordagem descritiva. Por exemplo, uma das questões a serem respondidas é se o clima da caverna está sendo influenciado por processos antrópicos e/ou naturais. As variáveis de temperatura e umidade geralmente sofrem variações temporais naturais, nesse sentido, como identificar se estas variações estão ocorrendo devido a processos naturais ou impactos antropogênicos? Sabe-se que o clima da caverna pode ser influenciado por uma série de fatores em escala local e regional. Então, como determinar quais fatores são responsáveis por influenciar estas variáveis resposta somente através de observações visuais? Neste sentido, as análises estatísticas entram para auxiliar nesse processo de procurar respostas as nossas perguntas. Ou seja, no processo de testar hipóteses. Hipóteses são explicações potenciais das observações que obtivemos nas pesquisas de campo ou laboratório. Elas usualmente descrevem relações de causa e efeito entre um mecanismo ou processo proposto (a causa) e nossas observações (efeitos). E para responder isso, as análises geralmente quantificam a probabilidade de um evento acontecer.

Várias são as análises estatísticas que podem ser realizadas para responder as perguntas de um monitoramento climático, e esse número aumenta cada dia mais. Atualmente temos uma série de livros que abordam o assunto, descrevendo as estatísticas utilizadas para dados temporais (e.g. Brockwell; Davis, 1991; Cryer; Chan, 2008; Derryberry, 2014; Shumway; Stoffer, 2017) e climatológicos (Pruscha, 2013; Storch; Zwiers, 2003), além de diversos artigos científicos publicados em revistas de alto fator de impacto. É importante ressaltar que a escolha de análises inapropriadas pode gerar falsas conclusões acerca dos dados coletados. Isso é ainda mais preocupante em estudos de licenciamento ambiental, que irão guiar a tomada de decisão, conciliando os interesses da empresa e a conservação do patrimônio espeleológico. Os dados precisam, contudo, se encaixar nas premissas das análises, e este cuidado deve ser tomado na hora de escolher o método estatístico. A escolha da análise estatística vai depender das perguntas que se pretendem responder no trabalho e, geralmente, existe mais de um método estatístico que serve para responder uma mesma pergunta. Abaixo serão citadas algumas das análises possíveis de serem realizadas neste tipo de estudo:

variables are measured every hour over a long period of time (Storch; Zwiers, 2002).

Environmental monitoring requires answering important questions that are difficult to answer without appropriate statistical analyses or only with a descriptive approach. One of these questions is whether the cave climate is being influenced by anthropogenic and/or natural processes. The variables of temperature and humidity generally undergo natural temporal variations. Thus, how can it be determined whether these variations are occurring due to natural processes or anthropogenic impacts? Cave climate is known to be influenced by a series of factors on local and regional scales. So, how can the factors responsible for influencing these variables be determined through visual observations alone? This is where statistical analyses aid the process of seeking answers to these questions. In other words, this is the process of testing hypotheses, which are potential explanations of observations obtained by field or laboratory research. Hypotheses usually describe cause-and-effect relationships between a proposed mechanism or process (the cause) and observations (effects). To answer this, the analyses generally quantify the probability of an event occurring.

There are several statistical analyses that can be performed to answer questions about climate monitoring, and the number of them is increasing every day. There is a series of current books that address the subject, describing the statistics used for temporal (e.g. Brockwell; Davis, 1991; Cryer; Chan, 2008; Derryberry, 2014; Shumway; Stoffer, 2017) and climatological (Pruscha, 2013; Storch; Zwiers, 2003) data, in addition to several scientific articles published in high-impact journals. It is important to emphasize that choosing inappropriate analyses can generate false conclusions about collected data. This is even more worrying in environmental licensing studies that will guide decision-making,reconciling company interests with the conservation of speleological heritage. The data must, however, fit the premises of the analyses, and care must be taken when choosing the statistical method. The choice of statistical analysis will depend on the questions to be answered by a given study, and there is usually more than one such method that can answer the same question. Below are some of the possible analyses that can be performed in this type of study:

1. Teste de correlação de Pearson ou de Spearman para identificar se existe correlação entre os dados climáticos do meio externo (epígeo) com o cavernícola (hipógeo). É possível também comparar a dinâmica temporal das cavernas monitoradas com a de cavernas consideradas controle, que estão localizadas em áreas conservadas, fora da área de influência do empreendimento. Variáveis colineares ou correlacionadas são aquelas que possuem relação ou semelhança uma com a outra. Ou seja, o aumento de uma gera o aumento ou diminuição da outra. A correlação gera um valor de coeficiente de Pearson ("r") ou de Spearman (rho) e um valor de "p" (mostrando o nível de significância da correlação). O coeficiente de correlação indica a força da correlação entre duas variáveis e pode variar entre 1 e -1, sendo 1 uma correlação positiva perfeita e -1 uma correlação negativa perfeita. Quanto mais distante o coeficiente for de 0 maior a força da correlação e quanto mais próximo de 0 menor esta força. Correlações positivas significam que o aumento de uma variável implica no aumento da outra. Enquanto isso, nas correlações negativas, o aumento de uma variável gera a diminuição de outra. Esta análise só pode ser feita usando os registros de dados simultâneos dos locais que estão sendo comparados (Ver Figura 4 e Figura 10);
2. Análise de correlação cruzada para entender se o efeito das variáveis climáticas do meio epígeo sobre o meio hipógeo acontecem com algum atraso ou antecedência temporal (e.g. antes ou depois de horas). Desta forma, a análise de correlação cruzada testa o grau de similaridade entre duas séries temporais em tempos diferentes. Esta análise vem sendo utilizada por um longo tempo em diferentes disciplinas, tendo sido popularizada em pesquisas climatológicas no século passado, como as de Walker (1923, 1924);
3. Teste de Mann-Kendall para avaliar a existência de tendências de aumento ou redução das variáveis climáticas (Hirsch; Slack; Smith, 1982, Kendall, 1938; Mann, 1945) (Figura 11). No entanto, para a realização do teste de Mann-Kendall não pode haver autocorrelação temporal dos dados. A existência de uma autocorrelação positiva nos dados aumenta a probabilidade de se detectar tendências onde estas não existem e vice-versa (Hamed; Rao, 1998). Autocorrelação temporal se refere quando temos relação entre valores sucessivos de uma mesma variável, ou seja, correlação de uma variável com ela mesma. Isso acontece

1. Pearson or Spearman correlation tests are used to identify whether any correlation exists between climatic data of the external (epigean) environment and that of the cave (hypogean) environment. It is also possible to compare the temporal dynamics of monitored caves with those of caves considered as controls located in preserved areas, outside the area of influence of the project. Collinear or correlated variables are those that are related or similar to each other. In other words, an increase in one generates an increase or decrease in the other. The correlation generates a Pearson coefficient ("r") or Spearman coefficient (rho) value and a "p" value (showing the level of the significance). The correlation coefficient indicates the strength of the correlation between two variables and can vary between 1 and -1, with 1 being a perfect positive correlation and -1 being a perfect negative correlation. The further the value of the coefficient if from zero, the greater the strength of the correlation, and the closer to 0, the lower this strength. Positive correlations mean that an increase in one variable implies an increase in the other. Meanwhile, negative correlations means that an increase in one variable leads to a decrease in the other. This type of analysis can only be done using data recorded simultaneously in the compared locations (See Figure 4 and Figure 10);
2. Cross-correlation analysis is used to understand whether the effects of climatic variables of the epigean environment on those of the hypogean environment occur with some delay or advance in time (e.g., before or after hours). Thus, cross-correlation analysis tests the degree of similarity between two time series at different times and has a history of use in different disciplines, having been popularized in climatological research in the last century, such as that of Walker (1923,1924);
3. Mann-Kendall test is used to assess the existence of increasing or decreasing trends in climatic variables (Hirsch; Slack; Smith, 1982; Kendall, 1938; Mann, 1945) (Figure 11). However, the Mann-Kendall test requires that there is no temporal autocorrelation of the data. The existence of positive autocorrelation in the data increases the probability of detecting trends where they do not exist and vice versa (Hamed; Rao, 1998). Temporal autocorrelation occurs when there is a relationship between successive values of the same variable, that is,

quando as observações são medidas em um espaço de tempo muito curto (de hora em hora, por exemplo). Desta forma, uma observação num determinado instante está relacionada às observações passadas. Por este motivo, antes da realização da análise, os dados devem ser testados para verificar a existência de autocorrelação temporal. Caso essa autocorrelação exista, pode ser utilizado o teste de Mann-Kendall modificado para dados temporalmente correlacionados (Hamed; Rao, 1998);

4. Modelos lineares generalizados (GLM) e modelos lineares generalizados mistos (GLMM) a fim de avaliar quais variáveis (variáveis explicativas bióticas e abióticas) são capazes de influenciar o clima no interior das cavernas, comparar a média das variáveis climáticas entre diferentes regiões da caverna e o meio externo (Figura 12) e entre diferentes períodos sazonais. Estes modelos nada mais são do que análises de média e regressão mais robustas e flexíveis, permitindo a adequação de acordo com a distribuição dos dados. Modelos lineares generalizados mistos possuem o mesmo propósito dos modelos lineares generalizados, contudo, nestes modelos é possível controlar o efeito de variáveis aleatórias e/ou aninhadas que podem influenciar os resultados da análise. Os modelos lineares generalizados mistos permitem a inclusão de variáveis fixas e aleatórias. A inclusão de variáveis aleatórias é importante para casos em que temos pseudo-repetição espacial ou temporal no experimento, permitindo controlar os efeitos destas variáveis nos modelos, deixando as análises mais robustas. Desta forma, a análise de GLMM é considerada uma ferramenta estatística poderosa, que pode resolver questões estatísticas chave, tais como quando a premissa de independência dos dados é violada (Harrison *et al.*, 2018);
5. Teste de variância (teste F) para identificar se existem diferenças na variação dos dados de temperatura e umidade entre o meio interno e externo (identifica qual dos dois ambientes tem maior variância dos dados).

2.8 Como saber que o clima está sendo influenciado negativamente por fatores antrópicos?

Tradicionalmente, a avaliação das condições climáticas dos sistemas cavernícolas tem sido feita através da comparação com "cavernas controle". As "cavernas controle" são aquelas que se encontram em áreas conservadas, e, portanto, que não estão sob a influência de potenciais impactos gerados por

a correlation of a variable with itself. This occurs when observations are measured in a very short space of time (hourly, for example). In this way, an observation at a given time is related to past observations. For this reason, the data must be tested before performing the analysis to verify the existence of temporal autocorrelation; if autocorrelation exists, the modified Mann-Kendall test for temporally correlated data can be used (Hamed; Rao, 1998);

4. Generalized linear models (GLM) and generalized linear mixed models (GLMM) are used to assess which variables (biotic and abiotic explanatory variables) are capable of influencing the climate inside caves, compare the average of the climatic variables for each of the different regions of the cave with the that of the external environment (Figure 12) and between different seasonal periods. These models are nothing more than mean and regression analyses, that allows an adaptation according to the distribution of the data. In other words, they are more robust and flexible analysis. Generalized linear mixed models have the same purpose as generalized linear models. However, with these models it is possible to control the effect of random and/or nested variables that can influence the results of the analysis. Generalized linear mixed models allow the inclusion of fixed and random variables. The inclusion of random variables is important for cases in which we have spatial or temporal pseudoreplication in the experiment, allowing the effects of these variables to be controlled in the models, making the analyses more robust. Thus, GLMM analysis is considered a powerful statistical tool that can resolve key statistical issues, such as when the assumption of data independence is violated (Harrison *et al.*, 2018);
5. Variance test (F test) is used to identify whether there are differences in the variation of temperature and humidity data between internal and external environments (identifies which of the two environments has the greatest data variance).

2.8 How to determine whether the climate is being negatively influenced by anthropogenic factors?

Assessments of the climatic conditions of cave systems have traditionally been done by comparing them with "control caves". "Control caves" are those located in preserved areas and, as such, are not subject to the potential impacts generated by

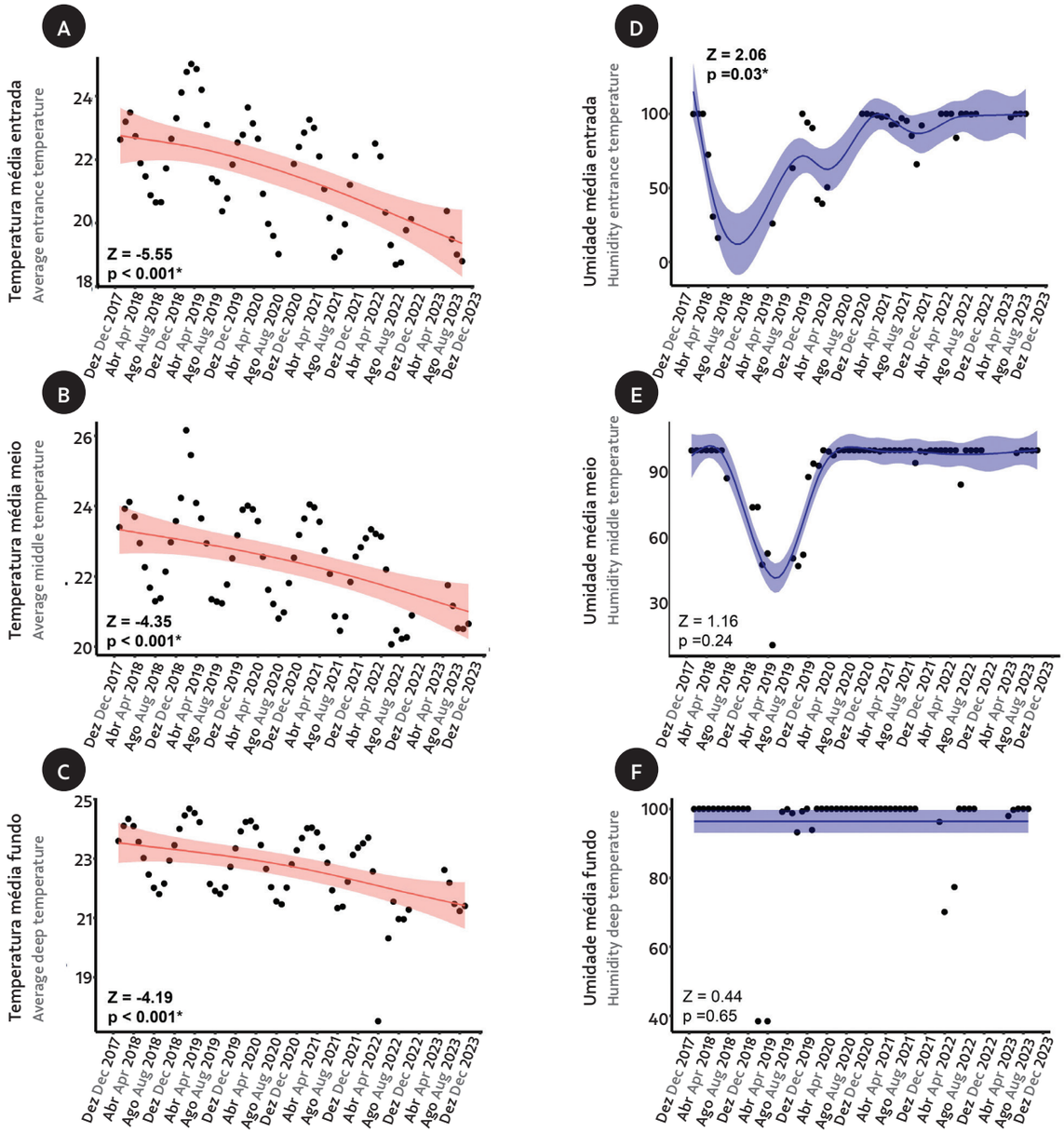


Figura 11: Valores médios mensais de temperatura e umidade registrados na entrada, meio e no fundo da cavidade MDIR_0028, localizada na área de influência da Mina de Brucutu/Cava da Divisa (Vale S.A), São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. No gráfico são apresentados os resultados do teste de Mann-Kendall (MKT) utilizado para avaliar se os dados de temperatura e umidade apresentam tendência significativa de aumento ou diminuição. Valores em negrito e com asterisco (*) são considerados significativos ($p < 0,05$), mostrando que existe algum tipo de tendência temporal significativa. Os valores de Z indicam a inclinação da tendência; se negativo, a temperatura e umidade tendem ao declínio temporal; se positivo, a temperatura e a umidade tendem ao aumento. Fonte: Spelayon, 2024.

Figure 11: Monthly mean values of temperature and humidity recorded at the entrance, middle and deep zones of cave MDIR_0028, located in the area of influence of the Brucutu Mine/Cava da Divisa (Vale S.A), municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. The graph presents the results of the Mann-Kendall test (MKT) used to assess whether the temperature and humidity data show a significant upward or downward trend. Values in bold and with an asterisk (*) are considered significant ($p < 0.05$), showing that there is some type of significant temporal trend. The Z values indicate the slope of the trend; if negative, the temperature and humidity tend to decline over time; if positive, the temperature and humidity tend to increase. Source: Spelayon, 2024.

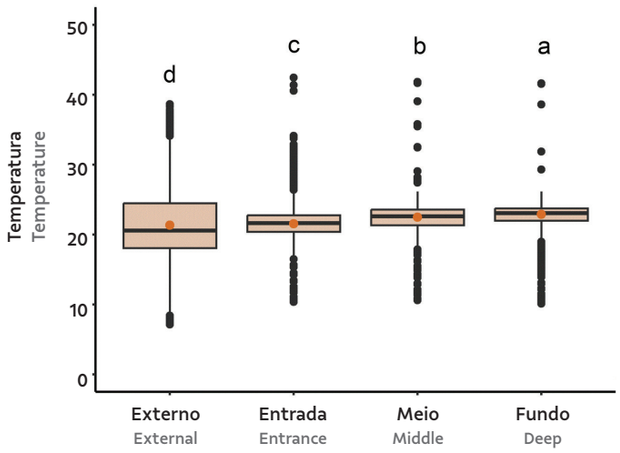


Figura 12: Comparação entre a média da temperatura obtida no meio externo (epígeo), entrada, meio e fundo da cavidade MDIR_0028. O círculo laranja do gráfico de *boxplot* representa a média, e a linha contínua preta representa a mediana da temperatura. A variabilidade dos dados é representada pelas retas que se estendem verticalmente a partir da caixa, no seu limite inferior e superior. Os círculos representam valores atípicos, diferentes do usual. Letras diferentes representam diferenças significativas entre as categorias ($p < 0.05$). Fonte: Spelayon, 2024.

Figure 12: Comparison of the mean temperature obtained in the external environment (epigeal), entrance with that of the middle and deep of cave MDIR_0028. The orange circle in the boxplot graph represents the mean temperature while the solid black line represents the median temperature. The variability of the data is represented by the straight lines that extend vertically from the box, at its lower and upper limits. The circles represent atypical values, different from the usual. Different letters represent significant differences between categories ($p < 0.05$). Source: Spelayon, 2024.

atividades antrópicas. No entanto, o clima de uma caverna é determinado por uma série de variáveis, não só antrópicas, mas também naturais, tais como: inserção na paisagem e aspectos da fitofisionomia do seu entorno, litologia, tamanho, morfologia, quantidade e posição de suas entradas, entre outros, o que significa que cada caverna possui condições ambientais únicas e, portanto, não permite sua comparação com outras cavernas, mesmo que estejam espacialmente próximas. Estes fatores acabam dificultando a comparação do clima das cavernas monitoradas com o das cavernas controle. Existem grandes chances de haver diferenças climáticas naturais entre estes dois grupos de cavernas, e não necessariamente, estas diferenças estarão relacionadas com a sua proximidade a áreas antropizadas. Sendo assim, a comparação com cavernas controle pode não fornecer as informações necessárias para realmente compreender se o empreendimento está influenciando o clima em uma determinada região.

Em um cenário ideal, o monitoramento climático nas cavernas deveria começar antes mesmo da construção e instalação de empreendimentos considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores do patrimônio espeleológico. Desta forma, seria possível conhecermos os padrões climáticos das cavernas antes do empreendimento ter sido instalado, e este monitoramento continuaria ao longo da instalação e operação deste empreendimento. Certamente, com a utilização desta abordagem (conhecida como "*before and after approach*" – antes e depois da intervenção) seria possível identificar mudanças no clima destas cavernas com mais facilidade, sem a necessidade de ter cavidades naturais subterrâneas controle no estudo.

human activities. However, the climate of a cave is determined by a series of variables, not only human-caused but also natural, such as its insertion into the landscape and aspects of the phytophysiognomy of its surroundings, as well as its lithology, size, morphology, and number and position of entrances, among others. This means that each cave has unique environmental conditions, which does not allow for comparisons with other caves, even if they are spatially close. These factors end up making it difficult to compare the climate of monitored caves with that of control caves. There is a high likelihood that natural climatic differences exist between these two groups of caves, differences that are not necessarily related to their proximity to anthropized areas. Therefore, comparisons with control caves may not provide the information needed to truly understand whether an anthropogenic activity is influencing the climate in a particular region.

In an ideal scenario, climate monitoring in caves should begin even before the construction and installation of industrial activities considered to be effectively or potentially polluting or degrading to speleological heritage. This would make it possible to know the climate patterns of caves before the installation of an industrial project, and this monitoring would continue throughout the installation and operation of the project. Using this approach (known as the "*before and after approach*") would certainly make it possible to identify changes in the climate of these caves more easily, without the need to have control caves in the study. The control would be the pristine climate conditions

O controle seria as condições pristinas do clima da própria caverna monitorada antes da existência de potenciais impactos no seu entorno. Apesar deste cenário parecer logisticamente e financeiramente inviável em um primeiro momento, podendo inclusive atrasar o andamento do licenciamento ambiental, na verdade devemos refletir sobre outra ótica, promovendo talvez, a quebra de paradigmas.

Em geral, os estudos de diagnóstico espeleológico são iniciados com pelo menos um ano de antecedência, pois requerem a amostragem de fauna nas estações seca e úmida, assim como outros estudos de meio biótico e físico necessários para a elaboração dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA). Neste momento, uma vez que os trabalhos de prospecção espeleológica já foram realizados, já se torna possível escolher cavernas mais importantes localizadas na área de influência do empreendimento para o início de um monitoramento climático e estabelecimento de um *background* para estas cavernas mais relevantes (e.g. maiores em dimensões, com espécies troglóbias já descritas ou com espeleotemas raros ou mais sensíveis por exemplo). Estes *backgrounds* se tornariam valiosas fontes de informação sobre a condição original destas cavernas, permitindo uma comparação a *posteriori* fidedigna sobre o status de conservação do patrimônio espeleológico frente a instalação e operação do empreendimento. Além de uma boa prática, os custos atrelados a esta ação seriam minimizados pela exclusão da necessidade de monitorar cavernas controle ao longo dos anos.

Nesse sentido, frente a possibilidade de impactos potenciais sobre o patrimônio espeleológico, as respostas do monitoramento climático podem ser obtidas através da realização de análises estatísticas apropriadas (já discutidas neste capítulo), para verificar se o clima das cavernas está mudando significativamente ao longo do tempo (e.g. se a temperatura ou umidade estão apresentando um aumento ou diminuição temporal). Além disso, é extremamente importante realizar o monitoramento da paisagem do entorno das cavernas (e.g. porcentagem de vegetação nativa, áreas antropizadas, avanço de áreas antropizadas sobre o ambiente cavernícola) e das condições ambientais no interior do ambiente cavernícola (e.g. quantidade de material particulado, manutenção da dinâmica hídrica, redução no aporte trófico, presença ou ausência de grandes populações de morcegos) a fim de realizar análises de causa e efeito. Sendo assim, além de tentar identificar se o clima da caverna está mudando, é necessário avaliar quais fatores são responsáveis por essas eventuais alterações. São fatores naturais

of the cave itself, monitored before the existence of potential impacts on its surroundings. Although this scenario may seem logistically and financially unfeasible at first, and could even delay the progress of environmental licensing, perhaps there is a need to reflect from another perspective, perhaps promoting a paradigm shift.

Speleological diagnostic studies are generally initiated at least one year in advance, as they require fauna sampling in the dry and wet seasons, as well as other studies of the biotic and physical environment necessary for the preparation of Environmental Impact Studies (EIS). At this point, when the speleological prospecting work has already been carried out, it becomes possible to choose the most important caves, located in the area of influence of the project, to begin climate monitoring and to establish a *baseline* for these more relevant caves (e.g., larger in size, with troglobitic species already described or with rare or more sensitive speleothems). Such *baselines* would be valuable sources of information on the original condition of these caves, allowing a reliable a posteriori comparison of the conservation status of the speleological heritage in light of the installation and operation of the industrial project. In addition to being a good practice, the costs associated with this action would be minimized by eliminating the need to monitor control caves over the years.

In this sense, and given the possibility of potential impacts on speleological heritage, climate monitoring responses can be obtained by performing appropriate statistical analyses (already discussed in this chapter) to determine whether the cave climate is changing significantly over time (e.g., whether temperature or humidity are increasing or decreasing over time). In addition, it is extremely important to monitor the landscape surrounding caves (e.g., percentage of native vegetation, anthropized areas, advance of anthropized areas over the cave environment) and the environmental conditions inside the cave (e.g., quantity of particulate matter, maintenance of water dynamics, reduction in trophic input, presence or absence of large bat populations), in order to perform cause and effect analyses. Therefore, in addition to trying to identify whether the cave climate is changing, it is necessary to evaluate which factors

ou antrópicos? Por este motivo é extremamente importante realizar análises que relacionem as variáveis climáticas com variáveis explicativas naturais e antrópicas referentes ao ambiente cavernícola e seu entorno. Por exemplo, é interessante relacionar os dados climáticos das cavernas com os dados espeleométricos das cavernas, com os dados climáticos do ambiente externo, dados de paisagem do entorno, de quantidade de material particulado no interior das cavernas, entre outros (Figura 13). A escolha das variáveis explicativas que devem ser mensuradas no monitoramento dependerá da realidade da área de estudo em questão. Por exemplo, na Figura 13 temos um dos resultados obtidos no monitoramento climático realizado em cavernas localizadas na área de influência da Mina de Brucutu, localizado em São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais (Spelayon, 2022). As variáveis climáticas registradas ao longo do tempo em cada uma das cavernas monitoradas foram relacionadas com variáveis de paisagem avaliadas no entorno destas cavidades. A umidade média e variação da umidade (desvio padrão) registrada a cada seis meses na caverna BRU_0034 apresentou relação significativa com a porcentagem de áreas impactadas ao redor da caverna. Nesse sentido, o aumento na porcentagem de áreas impactadas acabou gerando uma diminuição na umidade média do meio hipógeo e um aumento na variação nos valores de umidade ao longo do tempo (Figura 13).

are responsible for these possible changes. Are they natural or anthropic factors? For this reason, it is extremely important to carry out analyses that relate climatic variables with natural and anthropogenic explanatory variables relating to the cave environment and its surroundings. It is interesting to relate cave climate data to cave speleometric data, to climate data from the external environment, to data from the surrounding landscape, and to the amount of particulate matter inside caves, among other factors (Figure 13). The choice of explanatory variables to be measured during monitoring will depend on the reality of the study area in question. As an example, Figure 13 shows some results obtained by climate monitoring carried out in caves located in the area of influence of the Brucutu Mine, located in São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais (Spelayon, 2022). The climate variables recorded over time in each of the monitored caves were related to landscape variables evaluated in the surroundings of these caves. Average humidity and variation in humidity (standard deviation) recorded every six months in cave BRU_0034 showed a significant relationship with the percentage of impacted area around the cave. In this sense, the increase in the percentage of impacted area ended up generating a decrease in the average humidity of the hypogean environment and an increase in the variation in humidity over time (Figure 13).

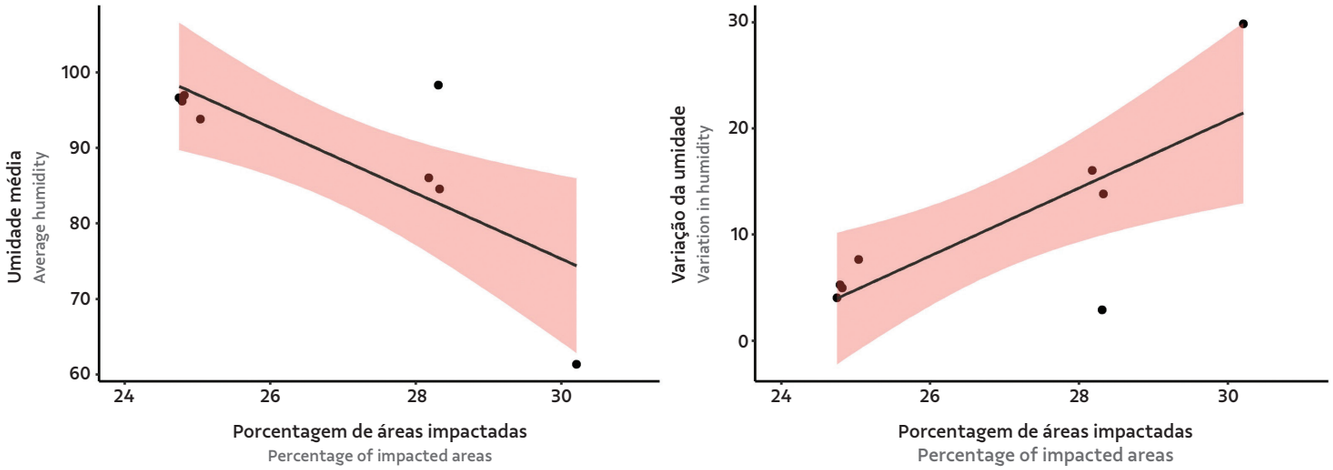


Figura 13: Relação entre a umidade média e entre a variação temporal da umidade (desvio padrão) registrada na caverna BRU_0034 e a porcentagem de áreas impactadas ao longo do tempo ao redor da caverna (em um raio de 250 m). A caverna BRU_0034 é alvo do monitoramento climático do projeto monitoramento da Mina de Brucutu, Vale S.A., município de São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. Fonte: Spelayon, 2022.
Figure 13: Relationship between average humidity and temporal variation in humidity (standard deviation) recorded in cave BRU_0034 and the percentage of impacted area over time around the cave (within a radius of 250 m). Cave BRU_0034 is the target of climate monitoring for the Brucutu Mine monitoring project, Vale S.A., in the municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais. Source: Spelayon, 2022.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos climáticos em cavernas têm sido realizados de forma mais sistemática há apenas algumas décadas. E, apesar do grande crescimento teórico e prático nesta área do conhecimento nos últimos anos, a escassez de informações é ainda uma realidade, principalmente para cavernas ferríferas, onde inexistem publicações científicas até o momento. A maioria das pesquisas tem sido baseadas em estudos de caso, para conhecer as condições climáticas de uma ou de um pequeno grupo de cavernas específicas, ou realizada em cavernas turísticas a fim de compreender os efeitos do turismo sobre o clima. Pesquisas desta natureza dificultam a extrapolação dos resultados de um sistema para outro, e consequentemente, de gerar avanços nesta área do conhecimento. As pesquisas realizadas em ampla escala temporal e espacial ainda são raras e começaram a ser implementadas apenas nos últimos anos (e.g. Medina *et al.*, 2023), sendo no Brasil, atreladas aos monitoramentos ambientais de grandes empreendimentos.

Estas pesquisas em maior escala são essenciais para conhecer os padrões climáticos de cavernas inseridas em diferentes situações. Ainda não existem estudos, por exemplo, que comparem as características climáticas de cavernas em diferentes litologias, altitudes, fitofisionomias ou mesmo biomas. Até o momento nenhum trabalho buscou conhecer os padrões climáticos de cavernas inseridas em locais preservados e locais antropizados, ou em cavernas localizadas em diferentes contextos de paisagem (e.g. menor/maior porcentagem de florestas no entorno, menor/maior porcentagem de áreas antropizadas no entorno). Sendo assim, é necessário aumentarmos o nosso conhecimento básico para servir como referência na interpretação dos resultados obtidos em monitoramentos climáticos do licenciamento ambiental. Finalmente, apesar de já existirem inciativas como estas no exterior, especialmente para cavernas turísticas (Marikovičová; Omelka; Krovina, 2015), no Brasil ainda precisamos evoluir na utilização de estações de monitoramento automatizadas que permitam a obtenção e o envio de dados de forma remota, sem a necessidade de trabalhos de campo ou pelo menos com a redução da exposição de colaboradores e dos impactos resultantes da incursão excessiva em cavernas.

3 FINAL CONSIDERATIONS

Studies of the climate of caves have been carried out in a more systematic manner for only a few decades. Despite the great theoretical and practical growth in this area of knowledge in recent years, a scarcity of information is still the reality, especially for ferriferous caves where there have been no scientific publications to date. Most research has been based on case studies to understand the climatic conditions of one or a small group of specific caves or was carried out in tourist caves to understand the effects of tourism on cave climate. Research of this nature makes it difficult to extrapolate the results from one system to another and, consequently, to generate advances in this area of knowledge. Research carried out on broad temporal and spatial scales is still rare and has only begun to be implemented in recent years (e.g., Medina *et al.*, 2023), and in Brazil it is linked to the environmental monitoring of large projects.

Larger-scale research is essential to understand the climate patterns of caves located in different situations. There are still no studies, for example, that compare the climate characteristics of caves in different lithologies, phytophysiognomies or even biomes or at different altitudes. No study to date has sought to understand the climatic patterns of caves located in preserved and anthropized locations, or in caves located in different landscape contexts (e.g., lower/higher percentage of forest or anthropized area in the surroundings). Therefore, it is necessary to increase basic knowledge to serve as a reference in the interpretation of results obtained by cave climate monitoring for environmental licensing. Finally, although initiatives like these already exist abroad, especially for tourist caves (Marikovičová; Omelka; Krovina, 2015), efforts in Brazil still need to evolve in the use of automated monitoring stations that allow data to be obtained and sent remotely, without the need for field work or at least with a reduction in the exposure of employees and the impacts resulting from excessive incursions into caves.

4 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à equipe da Vale pelo convite para contribuir com esta importante publicação sobre o monitoramento de cavernas inseridas em formação ferrífera, um tema ainda bastante incipiente na Espeleologia. Nosso agradecimento se estende às empresas que disponibilizaram dados e imagens utilizados neste capítulo, em especial à Spelayon Consultoria. Agradecemos também ao amigo Carlos Frederico de Souza Lott, pela cessão de imagens de equipamentos; a Jovenil Ferreira de Souza, pelo acompanhamento nos trabalhos de campo; e, principalmente, a todos os profissionais que participaram de dezenas de incursões em cavernas ferríferas de diferentes regiões do Brasil para a coleta de dados. Por fim, expressamos nossa gratidão aos analistas das Unidades Regionais de Regularização Ambiental (URAs) da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais, pela iniciativa em fomentar a evolução e a divulgação do conhecimento adquirido nos estudos de licenciamento ambiental.

4 ACKNOWLDGEMENTS

We would like to thank the Vale team for inviting us to contribute to this important publication on the monitoring of caves within ferriferous formations, a topic that is still very incipient in speleology. We would like to thank the companies that made their data and images available, especially Spelayon Consultoria. We would also like to thank our friend Carlos Frederico de Souza Lott for providing images of equipment, Jovenil Ferreira de Souza, for support us on the field work, and, above all, all the professionals who contributed with dozens of cave incursions to collect data on ferriferous caves in different regions of Brazil. Finally, we would like to express our gratitude to the analysts of the Unidades Regionais de Regularização Ambiental (URAs) of the Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável of the state of Minas Gerais for their concern in fostering the development and dissemination of knowledge obtained in environmental licensing studies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro de 2004**. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília: CONAMA, 2004. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 set. 2004. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=217. Acesso em: 10 out. 2024.

ALLAH, O. A. *et al.* Universal data logger system for environmental monitoring applications. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics – IJEEI**, v. 5, n. 2, p. 131–136, 2017. DOI: 10.52549/ijeei.v5i2.289.

BADINO, G. Cave temperatures and global climatic change. **International Journal of Speleology**, v. 33, n. 1/4, p. 103–114, 2004. DOI: http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.33.1.10.

BADINO, G. Underground meteorology: "what's the weather underground?". **Acta Carsologica**, v. 39, n. 3, p. 427–448, 2010. DOI: https://doi.org/10.3986/ac.v39i3.74.

BARRETT, L. *et al.* Habitual cave use and thermoregulation in chacma baboons (*Papio hamadryas ursinus*). **Journal of Human Evolution**, v. 46, n. 2, p. 215–222, 2004. DOI: 10.1016/j.jhevol.2003.11.005.

BENTO, D. de M. *et al.* Seasonal variations in cave invertebrate communities in the semiarid Caatinga, Brazil. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 78, n. 2, p. 61–71, 2016. DOI: 10.4311/2015LSC0111.

BIOESPELEO CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. **Plano de Gestão Espeleológica**: Projeto Serra Sul + 20 MTPA Complexo Eliezer Batista. Lavras: BioEspeleo, 2022. 187p. Relatório.

BIOESPELEO CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. **Plano de Gestão Espeleológica**: Projeto Serra Leste 10 MTPA. Lavras: BioEspeleo, 2024. Relatório.

BOTHE, O. What even is Climate? **Geoscience Communication Discussions**, v. 2018, p. 1–18, 2018. DOI: https://doi.org/10.5194/gc-2018-11.

BROCKWELL, P. J.; DAVIS, R. A. **Time series**: theory and methods. 2nd ed. New York: Springer, 1991.

CARDOSO, R. C.; FERREIRA, R. L.; SOUZA-SILVA, M. Multi-spatial analysis on cave ecosystems to predict the diversity of subterranean invertebrates. **Basic and Applied Ecology**, v. 65, p. 111–122, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.11.007.

CIGNA, A. A. Modern trend in cave monitoring. **Acta Carsologica**, Liubliana, v. 31, n. 1, p. 35–54, 2002a. DOI:10.3986/ac.v31i1.402.

CIGNA, A. A. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. **Acta Carsologica**, Liubliana, v. 31, n. 1, p. 175–177, 2002b. DOI:10.3986/ac.v31i1.412.

COLLET, G. C. **Quem é quem na espeleologia brasileira**. São Paulo: Edição do Autor, 1985.

CONSTANTIN, S. *et al.* Monitoring human impact in show caves: a study of four Romanian caves. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 4, p. 1–26, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13041619.

CRYER, J. D.; CHAN, K. S. **Time series analysis**: with applications in R. 2nd ed. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.

CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. **Espeleologia e licenciamento ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019. 55 p.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. Caves, as islands. *In:* GILLESPIE, R.; CLAGUE, D. (ed.). **Encyclopedia of islands**. Berkeley: University of California Press, 2009. p. 150–153.

CUNHA, A. R. da. Evaluation of measurement errors of temperature and relative humidity from HOBO data logger under different conditions of exposure to solar radiation. **Environmental Monitoring and Assessment**, [*s. l.*], v. 187, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1007/s10661-015-4458-x.

CZUPPON, G. *et al.* Cave monitoring in Hungary: an overview. **Central European Geology**, v. 65, n.1, p. 26–39. 2021. DOI: https://doi.org/10.1556/24.2021.00109.

DEHARVENG, L. *et al.* Global subterranean biodiversity: a unique pattern. **Diversity**, v. 16, n. 3, p. 1–24, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/d16030157.

DERRYBERRY, D. R. **Basic data analysis for time series with R**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

DOMÍNGUEZ-VILLAR, D. *et al*. Is global warming affecting cave temperatures? Experimental and model data from a paradigmatic case study. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 3-4, p. 569–581, 2015. DOI: 10.1007/s00382-014-2226-1.

DUNHAM, J. *et al*. **Measuring stream temperature with digital data loggers**: a user's guide. Fort Collins: USDA, 2005. General Technical Report. DOI: https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-150.

FERREIRA, R. L. et al. Spatial and temporal fluctuations of the abundance of Neotropical cave-dwelling moth *Hypena* sp. (Noctuidae, Lepidoptera) influenced by temperature and humidity. **Subterranean Biology**, v. 16, p. 47–60, 2015. DOI: 10.3897/subtbiol.16.5137.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A. de; SOUZA-SILVA, M. Subterranean biodiversity in ferruginous landscapes. *In*: MOLDOVAN, O. T.; KOVÁČ, L.; HALSE, S. (eds.) **Cave Ecology**. New York: Springer Cham, 2018. p. 435–447. (Ecological Studies, v. 235). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98852-8.

FERREIRA, R.L.; HOWARTH, F.G.; MAMMOLA, S. Moving foward: Mitigating the effect of climate change in subterranean ecosystems. In: DEMOLIN-LEITE, G.L. (ed.) **Terrestrial Biomes: Global Biome Conservation and Global Warming Impacts on Ecology and Biodiversity**. Volume 3. Academic Press, 2025, p. 265–275.

FRAGA, R. de *et al.* Caves as wildlife refuges in degraded landscapes in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1–11, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-32815-x.

FREITAS, C. R. de. The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. **Acta Carsologica**, v. 39, n. 3, p. 477–489, 2010. DOI: 10.3986/ac.v39i3.77.

GABROVŠEK, F. How do caves breathe: the airflow patterns in karst underground. **Plos One**, v. 18, n. 4, p.1–22, 2023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283767.

GOMES, M.; FERREIRA, R. L.; RUCHKYS, Ú. de A. Landscape evolution in ferruginous geosystems of the Iron Quadrangle, Brazil: a speleological approach in a biodiversity hotspot. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 1–13, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-019-1139-3.

GOMES, M. *et al.* Microclimatic characterization of tourist caves in Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais, Brazil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 33, p. 1–18, 2021a. DOI: https://doi.org/10.14393/SN-33-2021-58420.

GOMES, M. *et al.* Monitoramento microclimático de grutas turísticas em Minas Gerais: análise preliminar dos dados de temperatura e umidade relativa do ar em sete cavernas do parque nacional cavernas do Peruaçu. **Biodiversidade Brasileira**, v. 11, n. 4, p. 121–133, 2021b. DOI: https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v11i4.1767.

GUERRIER, B. *et al.* Climatology in shallow caves with negligible ventilation: heat and mass transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 146, p. 1–38, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106066.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 204, n. 1–4, p. 182–196, 1998. DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X.

HARRISON, X. A. *et al.* A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. **PeerJ.**, v. 6, p. 1–32, 2018. DOI: 10.7717/peerj.4794.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 107–121, 1982. DOI: 10.1029/WR018i001p00107.

JAFFÉ, R. *et al.* Reconciling mining with the conservation of cave biodiversity: a quantitative baseline to help establish conservation priorities. **Plos One,** v. 11, n. 12, p. 1–16, 2016. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168348.

JAFFÉ, R. *et al.* Conserving relics from ancient underground worlds: assessing the influence of cave and landscape features on obligate iron cave dwellers from the Eastern Amazon. **PeerJ.**, v. 6, p. 1–23, 2018. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.4531.

JUBERTHIE, C. The diversity of karstic and pseudokarstic hypogean: habitats in the world. *In*: WILKINS, H.; CULVER, D. C.; HUMPHREYS, W. F. (ed.). **Ecosystems of the world**: subterranean biota. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 17–29.

KENDALL, M. G. A new measure of rank correlation. **Biometrika**, v. 30, n. 1–2, p. 81–93, 1938. DOI: https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.81.

LADLE, R. J. *et al.* Unexplored diversity and conservation potential of neotropical hot caves. **Conservation Biology**, v. 26, n. 6, p. 978–982, 2012. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2012.01936.x.

LARIO, J.; SOLER, V. Microclimate monitoring of pozalagua cave (Vizcaya, Spain): application to management and protection of show caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 72, n. 3, p. 169–180, 2010. DOI: 10.4311/jcks2009lsc0093.

LOBO, H. A. S. Histórico das pesquisas espeleoclimáticas em cavernas brasileiras. **Revista Espeleo-Tema**, v. 21, n. 2, p. 131–144, 2010. Disponível

em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/07/espeleo-tema_v21_n2_131-144-1.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

LOBO, H. A. S. Espeleoclima e suas aplicações no manejo do turismo em cavernas. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, v. 23, p. 27–54, 2012. DOI: DOI:10.7154/RDG.2012.0023.0002.

LOBO, H. A. S.; BOGGIANI, P. C.; PERINOTTO, J. A. de J. Speleoclimate dynamics in Santana Cave (PETAR, São Paulo State, Brazil): general characterization and implications for tourist management. **International Journal of Speleology**, Tampa, v. 44, n. 1, p. 61–73, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.44.1.6.

LOBO, H. A. S.; LOURENÇÃO, M. L. F. Caracterização do espeleoclima da gruta do Mateus (Bonito-MS) e aplicações no manejo espeleológico e na gestão do espeleoturismo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. 1, p. 154–172, 2014. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.35515.

LOBO, H. A. S.; ZAGO, S. Iluminação com carbureteiras e impactos ambientais no microclima de cavernas: estudo de caso da lapa do Penhasco, Buritinópolis - GO. **Geografia**, Rio Claro, v. 35, n. 1, p. 183–196, 2010.

LUNDBERG, J.; MCFARLANE, D. A. Bats and bell holes: The microclimatic impact of bat roosting, using a case study from Runaway Bay Caves, Jamaica. **Geomorphology**, v. 106, n.1–2, p. 78–85, 2009. DOI:10.1016/j.geomorph.2008.09.022.

LUNGHI, E.; MANENTI, R.; FICETOLA, G. F. Do cave features affect underground habitat exploitation by non-troglobite species? **Acta Oecologica**, v. 55, p. 29–35, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.11.003.

MAMMOLA, S. *et al.* Climate change going deep: the effects of global climatic alterations on cave ecosystems. **The Anthropocene Review**, v. 6, n. 1-2, p. 98–116, 2019. DOI: https://doi.org/10.1177/2053019619851594.

MAMMOLA, S. *et al.* Fundamental research questions in subterranean biology. **Biological Reviews**, v. 95, n. 6, p. 1855–1872, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/brv.12642.

MAMMOLA, S.; ISAIA, M. Niche differentiation in Meta Bourneti and M. menardi (Araneae, Tetragnathidae) with notes on the life history. **International Journal of Speleology**, v. 43, n. 3, p. 343–353, 2014. DOI: 10.5038/1827-806X.43.3.11.

MAMMOLA, S.; GOODACRE, S. L.; ISAIA, M. Climate change may drive cave spiders to extinction. **Ecography**, Lund, v. 41, n. 1, p. 233–243, 2018. DOI: 10.1111/ecog.02902.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v.13, n. 3, p. 245–259, 1945. DOI: http://dx.doi.org/10.2307/1907187.

MARIKOVIČOVÁ, J.; OMELKA, J.; KROVINA, A. Introducing ICEMS: the Integrated Caves Environmental Monitoring System. **BCRA: Cave Radio & Electronics Group Journal**, v. 90, p. 20–24, 2015. Disponível em: https://bcra.org.uk/creg/. Acesso em: 10 out. 2024.

MARSH, D. M.; TRENHAM, P. C. Current trends in plant and animal population monitoring. **Conservation Biology**, v. 22, n. 3, p. 647–655, 2008. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00927.x.

MEDINA, M. J. *et al.* Temperature variation in caves and its significance for subterranean ecosystems. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1–9, 2023. | DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-48014-7.

MEJÍA-ORTÍZ, L. *et al.* What's the temperature in tropical caves?. **Plos One**, v. 15, n. 12, p. 1–21, 2020. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237051.

MEJÍA-ORTÍZ, L. *et al.* What's the relative humidity in tropical caves?. **Plos One**, v. 16, n. 9, p. 1–18, 2021. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250396.

MELO, L. M. R.; FERREIRA, R. L.; SOUZA-SILVA, M. A review of the factors influencing invertebrate community structure in subterranean habitats. **Community Ecology**, v. 1, p. 1–15, 2025.

NOVAK, T. *et al.* Adaptations in phalangiidae harvestmen Gyas annulatus and G. titanus to their preferred water current adjacent habitats. **Acta Oecologica**, v. 26, n. 1, p. 45–53, 2004. DOI: 10.1016/j.actao.2004.03.004.

OTÁLORA-ARDILA, A. *et al.* Ther-mally-Assisted Monitoring of Bat Abundance in an Exceptional Cave in Brazil's Caatinga Drylands. **Acta Chiropterologica**, v. 21, n. 2, p. 411–423, 2020. DOI: 10.3161/15081109ACC2019.21.2.016.

PALLARÉS, S. *et al.* Beyond survival experiments: using biomarkers of oxidative stress and neurotoxicity to assess vulnerability of subterranean fauna to climate change. **Conservation Physiology**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2020. DOI: https://doi.org/10.1093/conphys/coaa067.

PALLARÉS, S. *et al.* Heat tolerance and acclimation capacity in subterranean arthropods living under common and stable thermal conditions. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 24, p. 13731–13739, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.5782.

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, p. 156–165, 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228607008. Acesso em: 17 dez. 2024.

PEREIRA, H. M. *et al.* Global trends and scenarios for terrestrial biodiversity and ecosystem services from 1900–2050. **Science**, v. 384, n. 6694, p. 458–465, 2024. DOI:10.1126/science.adn3441.

PILÓ, L. B.; COELHO, A.; REINO, J. C. R. Geoespeleologia em rochas ferríferas: cenário atual e conservação. *In*: CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (ed.) **Geossistemas Ferruginosos do Brasil:** áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais**.** Belo Horizonte: 3i Editora, 2015. p. 521–543.

PILÓ, L. B. *et al.* Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia. **Plos One**, v. 18, n. 5, p. 1–24, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0267870.

PIMENTEL, N. T. *et al.* Estimates of insect consumption and guano input in bat caves in Brazil. **Mammal Research**, v. 67, p. 355–366, 2022.

DOI:10.1007/s13364-022-00629-3.

PIPAN, T. *et al.* Temperature variation and the presence of troglobionts in terrestrial shallow subterranean habitats. **Journal of Natural History**, v. 45, n. 3-4, p. 253-273, 2011. DOI:10.1080/00222933.2010.523797.

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. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329753467. Acesso em: 17 dez. de 2024.

PROUS, X.; FERREIRA, R. L.; JACOBI, C. M. The entrance as a complex ecotone in a Neotropical cave. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 2, p. 177-189, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.2.7.

PRUSCHA, H. **Statistical analysis of climate series**: analyzing, plotting, modeling, and predicting with R. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2013.

RABELO, L.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Epigean and hypogean drivers of Neotropical subterranean communities. **Journal of Biogeography**, v. 48, n. 3, p. 662-675, 2021. DOI: 10.1111/jbi.14031.

ROCHA, P. A. **Quirópterofauna 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.

RODRIGUEZ-DURAN, A. Nonrandom aggregations and distribution of cave-dwelling bats in Puerto Rico. **Journal of Mammalogy**, v. 79, n.1, p. 141-146, 1998. DOI: https://doi.org/10.2307/1382848.

SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, D. *et al.* Don't forget subterranean ecosystems in climate change agendas. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 6, p. 458-459, 2021. DOI:10.1038/s41558-021-01057-y.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications**: With R Examples. 4th ed. New York: Springer Cham, 2017.

SILVA, N. V. M. S. *et al*. Comparative analysis of radon gas concentration in caves developed in carbonatic, quartzitic and ferruginous lithologies. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 249, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106891.

SOUZA, P. E. de; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. The ticking clock in the dark: Review of biological rhythms in cave invertebrates. **Chronobiology International**, v 41, n.5, p. 738-756, 2024. DOI:10.1080/07420528.2024.2348010.

SPARROW, B. D. *et al.* Effective ecosystem monitoring requires a multi-scaled approach. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 95, n. 6, p. 1706-1719, 2020. DOI: 10.1111/brv.12636.

SPELAYON CONSULTORIA. **Relatório Anual de Monitoramento Espeleológico da Mina de Brucutu**: Monitoramento Hídrico. Belo Horizonte: Spelayon Consultoria, 2022. Relatório.

SPELAYON CONSULTORIA. **Relatório Anual de Monitoramento Espeleológico da Mina de Brucutu**: Monitoramento Hídrico. Belo Horizonte: Spelayon Consultoria, 2023. Relatório

SPELAYON CONSULTORIA. **Relatório Anual de Monitoramento Espeleológico da Mina de Brucutu**: Monitoramento Hídrico**.** Belo Horizonte: Spelayon Consultoria, 2024. Relatório.

STORCH, H. V.; ZWIERS, F. W. **Statistical Analysis in Climate Search**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

THURGATE, M. Monitoring. **Encyclopedia of Caves and Karst Science.** New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 628-642. ISBN 0-203-61963-3.

TREVELIN, L. C. *et al.* Optimizing speleological monitoring efforts: insights from long-term data for tropical iron caves. **PeerJ**, v. 16, n. 9, 2021. DOI:10.7717/peerj.11271.

VACCARELLI, I. *et al.* A global meta-analysis reveals multilevel and context-dependent effects of climate change on subterranean ecosystems. **One Earth**, v. 6, n. 11, p. 1510-1522, 2023. DOI:10.1016/j.oneear.2023.09.001.

VARGAS-MENA, J. C. *et al.* Diversity of cave bats in the Brazilian tropical dry forest of Rio Grande do Norte state. **Mastozoologia Neotropical**, v. 25, p. 199-212, 2018. Disponível em: https://www.scielo.org.ar/pdf/mznt/v25n1/v25n1a16.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

WAGHMARE, M. B.; CHATUR, P. N. Temperature and humidity analysis using data logger of data acquisition system: An approach. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 2, n. 1, p. 102-106, 2012. Disponível em: https://shre.ink/booy. Acesso em: 17 dez. 2024.

WALKER, G. T. Correlation in seasonal variations of weather, VIII: A preliminary study of world weather. **Memoirs of the India Meteorological Department**, v. 24, n. 4, p. 75-131, 1923. Disponível em: https://www.rmets.org/sites/default/files/papers/classicindia1.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

WALKER, G. T. Correlation in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather. **Memoirs of the India Meteorological Department**, v. 24, n. 9, p. 275-332, 1924. Disponível em: https://www.rmets.org/sites/default/files/classicindia2.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

WERNDL, C. On defining climate and climate change. **The British Journal for the** P**hilosophy of Science**, v. 67, n. 2, p. 337-661, 2016. DOI:10.1093/bjps/axu048.

WIND, M. *et al*. Multi-annual temperature evolution and implications for cave ice development in a sag-type ice cave in the Austrian Alps. **The Cryosphere**, v. 16, n. 8, p. 3163-3179, 2022. DOI: https://doi.org/10.5194/tc-16-3163-2022.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. Geneva: WMO, 2017.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 7th ed. Geneva: WMO, 2018.

YOCCOZ, N. G.; NICHOLS, J. D.; BOULINIER, T. Monitoring of biological diversity in space and time. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 16, n. 8, p. 446-453, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02205-4.



Gruta/Cave of Simmons
Foto/Photo: Robson de A. Zampaulo

6

Foto/Photo: Allan S. Callux

Monitoramento geoestrutural/geotécnico em cavernas ferríferas

IURI VIANA BRANDI
GEORGETE MACEDO DUTRA
THIAGO FERREIRA LIMA
ELOÁ CAROLINA VILELA DE OLIVEIRA
JULIO ALMEIDA MOREIRA
FERNANDO SANTOS SEABRA CARDOSO
JULIANA BARBOSA TIMO
RAFAEL SALVADOR NEVES COELHO
BRUNO FERNANDES DE AGUIAR
FERNANDO JOSÉ GALLO FRIGO
TOMÁS ROMUALDO CORRÊA
LUANA CAMILE SILVA SILVA

1 INTRODUÇÃO

As cavernas ou cavernas constituem-se de ecossistemas dinâmicos em constante evolução espacial e temporal. Fatores ambientais como clima, água, vegetação, geologia, geomorfologia, fauna e até mesmo os microrganismos influenciam diretamente nessa dinâmica. De acordo com a Constituição Federal Brasileira, as cavernas são bens da União (BRASIL, 1988) protegidos por uma série de dispositivos legais em níveis federal e estadual, criados para assegurar a preservação do patrimônio espeleológico para as gerações futuras (BRASIL, 1988).

Atualmente, o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (CECAV/ICMBio) tem cerca de 3.060 cavernas ferríferas cadastradas em seu banco de dados, sendo a maior parte delas situadas no estado do Pará (Serra dos Carajás), seguida pelo Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (CECAV, 2022). Esse cenário é observado devido ao maior esforço de prospecção nas áreas onde a extração de minério de ferro é intensa, demonstrando o forte vínculo da evolução do conhecimento entre a espeleologia no Brasil e a indústria de mineração.

Estudos físicos sobre a dinâmica ambiental desses ecossistemas são fundamentais para prever e entender seu comportamento estrutural e do maciço no qual se inserem (rocha encaixante). Sendo assim, algumas estruturas espeleológicas (salões e espeleotemas) e geológicas (maciços, descontinuidades, lineamentos, dobras etc.) podem ser utilizadas

Geostructural/geotechnical monitoring in ferriferous caves

IURI VIANA BRANDI
GEORGETE MACEDO DUTRA
THIAGO FERREIRA LIMA
ELOÁ CAROLINA VILELA DE OLIVEIRA
JULIO ALMEIDA MOREIRA
FERNANDO SANTOS SEABRA CARDOSO
JULIANA BARBOSA TIMO
RAFAEL SALVADOR NEVES COELHO
BRUNO FERNANDES DE AGUIAR
FERNANDO JOSÉ GALLO FRIGO
TOMÁS ROMUALDO CORRÊA
LUANA CAMILE SILVA SILVA

1 INTRODUCTION

Caves are dynamic ecosystems that are constantly evolving spatially and temporally. Environmental factors such as climate, water, vegetation, geology, geomorphology, fauna and even microorganisms directly influence these dynamics. According to the Constituição Federal Brasileira, caves are assets of the Union (BRAZIL, 1988) protected by a series of legal provisions at federal and state levels, created to ensure the preservation of speleological heritage for future generations (BRAZIL, 1988).

The Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) of the Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (CECAV/ICMBio) currently has approximately 3,060 ferriferous caves registered in its database, most of which are located in the state of Pará (Serra dos Carajás) followed by the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle) in the state of Minas Gerais (CECAV, 2022). This scenario is the results of greater prospecting effort in areas where iron ore extraction is intense and demonstrates the strong link between Brazilian speleology and the mining industry in the evolution of knowledge.

Physical studies on the environmental dynamics of cave ecosystems are essential to predict and understand their structural behavior and that of the rock mass in which they are inserted (host rock). Therefore, some speleological structures (halls and speleothems) and geological structures (masses, discontinuities, lineaments, folds, etc.) can be used as

como alvo de monitoramento. Essas estruturas são definidas a partir do levantamento topográfico da cavidade e do respectivo mapeamento geológico local e servem de embasamento para o diagnóstico geoestrutural (Figura 1) e o monitoramento geotécnico a ser estabelecido.

A análise da estabilidade estrutural das cavernas, principalmente daquelas situadas em zonas de mineração ou de empreendimentos com potencial de impactos ambientais sobre o patrimônio espeleológico, é necessária para assegurar a manutenção de seu equilíbrio físico e ambiental. As modificações nos componentes estruturais que compõem as cavernas (paredes, teto, piso, espeleotemas etc.) podem ter sua origem relacionada tanto a causas naturais quanto a processos antrópicos. Em casos de eventos de ruptura ou desplacamentos de fragmentos, e até mesmo desmoronamento parcial ou total de uma cavidade, os processos que precedem a instabilidade devem estar registrados no banco de dados do monitoramento.

Nesse contexto, o estabelecimento de cavernas "controle" localizadas distantes dos empreendimentos em operação, porém ainda inseridas no mesmo contexto geológico/geomorfológico, também é sugerido, uma vez que tais cavernas servem como parâmetro de comparação para a distinção de ocorrências relativas a processos naturais, intrínsecos à própria evolução das cavernas na paisagem local ou regional, daqueles de origem antrópica.

Dessa forma, este capítulo traz uma síntese sobre as boas práticas utilizadas para a execução de mapeamentos e monitoramentos geológicos e geotécnicos em cavernas

monitoring targets. These structures are defined based on a topographic survey of the cave and the respective local geological mapping, and serve as a basis for geostructural diagnosis (Figure 1) and establishing geotechnical monitoring.

The analysis of the structural stability of caves, especially those located in mining areas or in areas where there are projects with potential environmental impacts on speleological heritage, is necessary to ensure the maintenance of their physical and environmental balance. Changes in the structural components that make up caves (walls, ceiling, floor, speleothems, etc.) may be due to both natural causes and anthropogenic processes. In cases of rupture or displacement of fragments, and even partial or total collapse of a cave, the processes that preceded the instability must be recorded in the monitoring database.

In this context, the establishment of "control" caves located far from operating projects but still inserted in the same geological/geomorphological context, is also desired. This is because such caves serve as a comparison parameter for distinguishing occurrences related to natural processes, intrinsic to the evolution of caves in the local or regional landscape, from those of anthropic origin.

Thus, this chapter provides a summary of good practices used to perform geological and geotechnical mapping and

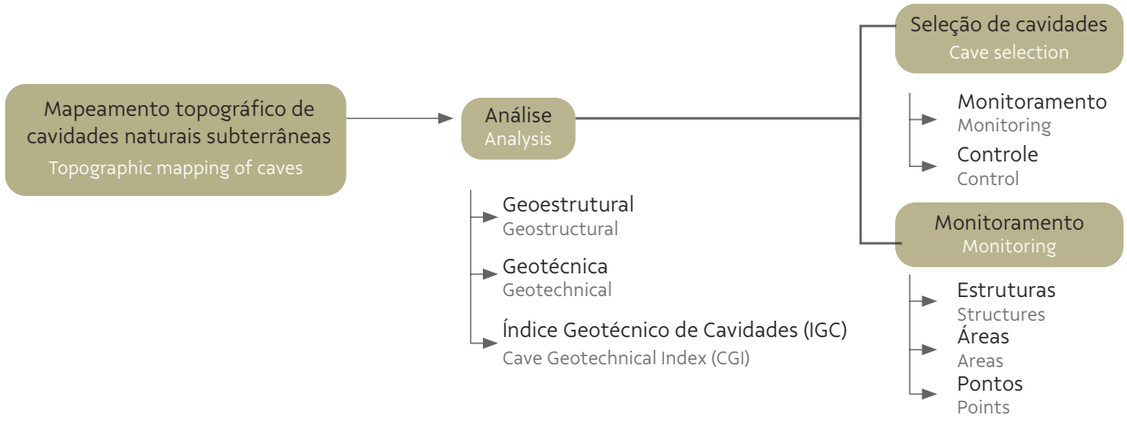


Figura 1: Principais etapas do diagnóstico estrutural de cavernas como subsídio para definição dos programas de monitoramento.
Figure 1: Main stages of the structural diagnosis of caves as support for defining monitoring programs.

associadas às formações ferríferas, apresenta os principais métodos rotineiramente aplicados nestes estudos e discute sua importância para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro em áreas sob influência de empreendimentos de mineração nesta litologia.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Conceitos geológicos

O reconhecimento de determinadas estruturas geológicas que compõem as cavernas é de suma importância para a classificação correta das mesmas e sua consequente aplicação no monitoramento geoestrutural e geotécnico. A seguir, são apresentados, de maneira sucinta, alguns termos frequentemente utilizados na rotina de trabalhos espeleológicos, seguindo as diretrizes de referências como Bradley (1962), Fossen (2012) e Tognon (2012).

- **Acamamento (acamadamento):** estratos ou camadas tabulares delimitadas por descontinuidades físicas, tais como mudança de textura, granulometria ou alteração química-mineralógica. Está relacionada às condições do ambiente deposicional no momento da sedimentação.
- **Bandamento:** faixas de diferentes composições mineralógicas ou texturais, geralmente paralelas entre si. Podem ser oriundas de uma estratificação pretérita (bandamento primário) ou podem ser produto de processos tectônicos (bandamento secundário).
- **Contato Litológico:** linha ou superfície de interseção entre duas litologias diferentes.
- **Eixo de Dobra:** linha definida pela interseção do plano axial da dobra com o plano de estratificação ou foliação. Em dobras cilíndricas equivalentes à linha de charneira.
- **Falha:** superfície ou zona tabular estrita que apresenta movimento paralelo relativo à fratura (tectônica).
- **Flanco de Dobra:** superfícies laterais de uma dobra, separadas pela zona de charneira.
- **Foliação:** estrutura tectônica planar da rocha formada por deformação em regime plástico, caracterizada pelo achatamento dos minerais.
- **Fratura:** qualquer descontinuidade planar ou subplanar formada por esforço externo (tectônico) ou interno (térmico ou residual) em regime rúptil.
- **Maciço rochoso:** unidade geológica considerada como um conjunto de blocos (rocha preservada) e as descontinuidades que as delimitam.

monitoring in caves associated with ferriferous formations. It also presents the main methods routinely applied in these studies and discusses their importance for the conservation of Brazilian speleological heritage in areas under the influence of mining ventures in this lithology.

2 THEORETICAL BASIS

2.1 Geological Concepts

The recognition of certain geological structures that make up caves is of utmost importance for their correct classification and subsequent application in geostructural and geotechnical monitoring. Some terms frequently used in the routine of speleological work follow, according to the guidelines of references such as Bradley (1962), Fossen (2012) and Tognon (2012).

- **Layering:** strata or tabular layers delimited by physical discontinuities, such as changes in texture, granulometry or chemical-mineralogical alteration. It is related to the conditions of the depositional environment at the time of sedimentation.
- **Banding:** bands of different mineralogical or textural compositions, generally parallel to each other. They may originate from past stratification (primary banding) or may be the product of tectonic processes (secondary banding).
- **Lithological Contact:** line or surface of intersection between two different lithologies.
- **Fold Axis:** line defined by the intersection of the axial plane of the fold with the stratification or foliation plane. Equivalent to the hinge line in cylindrical folds.
- **Fault:** strict tabular surface or zone that presents parallel movement relative to the fracture (tectonic).
- **Fold Flank:** lateral surfaces of a fold, separated by the hinge zone.
- **Foliation:** planar tectonic structure of rock formed by deformation in a plastic regime, characterized by the flattening of minerals.
- **Fracture:** any planar or subplanar discontinuity formed by external (tectonic) or internal (thermal or residual) stress in a brittle regime.
- **Rock Mass:** geological unit considered as a set of blocks (preserved rock) and the discontinuities that delimit them.

· **Veio:** fratura preenchida por precipitados minerais e/ou argila.

2.2 Principais feições de instabilidade estrutural

A avaliação do grau de instabilidade de um pacote rochoso em períodos de curto, médio e longo prazo, é um aspecto importante na análise do grau de fragilidade de cavernas. Conhecer o comportamento rúptil das rochas é fundamental para antecipar eventuais danos a esses ecossistemas. O acervo bibliográfico disponível acerca da instabilidade estrutural de cavernas é maior para terrenos carbonáticos do que para terrenos ferruginosos. Dessa forma, algumas ideias sobre instabilidade estrutural em carbonatos foram adaptadas, de maneira bem-sucedida, para cavernas inseridas na formação ferrífera.

De forma geral, os desabamentos no interior das cavernas são comuns e fazem parte da evolução natural destes ambientes podendo ser observados *in loco*. Feições internas que mostram planos proeminentes nos tetos ou paredes e grandes acúmulos de blocos no piso podem indicar zonas ou setores instáveis. Os tipos de padrões geométricos observados no interior das cavernas, como a forma do teto e vãos de grande amplitude, também indicam áreas mais suscetíveis a quedas de blocos ou mesmo ao colapso do teto.

Da mesma forma, a presença de blocos de diversos tamanhos no piso evidencia a frequência e intensidade desse processo. Em cavernas inseridas em formações ferríferas, por exemplo, é muito comum os mapas topográficos registrarem pisos recobertos de fragmentos. Tais observações são baseadas no mesmo raciocínio utilizado por White (2012) para a classificação de fragmentos de rocha em cavernas inseridas em regiões cársticas, porém, para este tipo de litologia, são levados em consideração critérios baseados na forma e tamanho (bloco, laje e *chip*). Enquanto em cavidades ferríferas, o conceito leva em consideração a variação na granulometria, que vai desde a fração fina (material arenoso-argiloso) até a fração grosseira (blocos e matacões). A litologia também exerce influência neste processo, de modo que fragmentos oriundos da formação ferrífera bandada podem apresentar formas tabulares ou angulosas, ao passo que fragmentos provenientes da canga são subangulosos a subarredondados.

2.1.1 Descontinuidades

As descontinuidades são definidas como qualquer feição geológica de superfície relativamente planar ou tabular que

· **Vein:** fracture filled with mineral and/or clay precipitates.

2.2 Main features of structural instability

Assessing the degree of instability of a rocky package over short, medium and long-term time periods is an important aspect of analyzing the degree of fragility of caves. Understanding the brittle behavior of rocks is essential to anticipate potential damage to cave ecosystems. The available literature on the structural instability of caves is greater for carbonate terrains than for ferruginous terrains. Thus, some ideas about structural instability in carbonates have been successfully adapted to caves inserted in ferriferous formations.

In general, collapses in the interior of caves are common and part of the natural evolution of these environments that can be observed *in loco*. Internal features that show prominent planes in the ceilings or walls and large accumulations of blocks on the floor may indicate unstable areas or sectors. The types of geometric patterns observed inside of caves, such as the shape of the ceiling and large spans, also indicate the susceptibility of areas to falling blocks or even roof collapse.

Likewise, the presence of blocks of different sizes on the floor highlights the frequency and intensity of this process. In caves located in ferriferous formations, for example, it is very common for topographic maps to record floors covered with fragments. Such observations are based on the same reasoning used by White (2012) to classify rock fragments in caves located in karst regions. However, for this type of lithology, criteria based on shape and size (block, slab and chip) are considered. For ferriferous caves, on the other hand, the concept takes into account variation in granulometry, which ranges from the fine fraction (sandy-clayey material) to the coarse fraction (blocks and boulders). Lithology also influences this process, so that fragments from banded ferriferous formations may have tabular or angular shapes, while fragments from canga are subangular to subrounded.

2.1.1 Discontinuities

Discontinuities are defined as any geological feature with a relatively flat or tabular surface that interrupts the continuity

interrompa a continuidade do maciço rochoso, influenciando diretamente na resistência do mesmo diante de processos de instabilidade estrutural. São representadas, principalmente, por planos de acamamento, contato litológico, juntas, fraturas e falhas em geral. Essas estruturas representam as principais zonas de fraqueza do maciço rochoso, condicionando suas propriedades mecânicas e sua estabilidade, principalmente quando se trata de ambientes subterrâneos. Segundo Hudson & Harrison (1997), elas podem ser o fator determinante que rege a deformabilidade, resistência e a permeabilidade do meio. Por esse motivo, é uma das feições mais utilizadas na maior parte dos sistemas de classificação geomecânica de rochas. Segundo o ISRM – *International Society for Rock Mechanics* (1978), a natureza das descontinuidades é definida por uma série de características, dentre elas a orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, preenchimento e percolação de água, além da definição das famílias às quais estão associadas. A Figura 2 ilustra algumas propriedades das descontinuidades encontradas em maciços rochosos.

3 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DE CAVERNAS

A partir do monitoramento geotécnico e mapeamento das feições de instabilidade estrutural, é possível identificar fatores ou "gatilhos" que favorecem a ocorrência de desmoronamentos em cavernas. Existem fatores considerados naturais, inerentes às circunstâncias e características físico-químicas do ambiente,

of the rock mass, directly influencing its resistance to processes of structural instability. They are mainly represented by layered planes, lithological contacts, joints, fractures and faults in general. These structures represent the main weak zones of the rock mass, conditioning its mechanical properties and stability, especially when it comes to subterranean environments. According to Hudson & Harrison (1997), they can be the determining factor that governs the deformability, resistance and permeability of the medium. For this reason, discontinuities are the most used features in most geomechanical rock classification systems. According to the International Society for Rock Mechanics (ISRM; 1978), the nature of discontinuities is defined by a series of characteristics, including orientation, spacing, persistence, roughness, opening, filling and water percolation, in addition to the definition of the families to which they are associated. Figure 2 illustrates some properties of discontinuities found in rock masses.

3 GEOTECHNICAL MAPPING OF CAVES

Geotechnical monitoring and mapping of structural instability features makes it possible to identify factors or "triggers" that favor the occurrence of cave collapses. Some of these factors are considered natural or inherent to the circumstances and

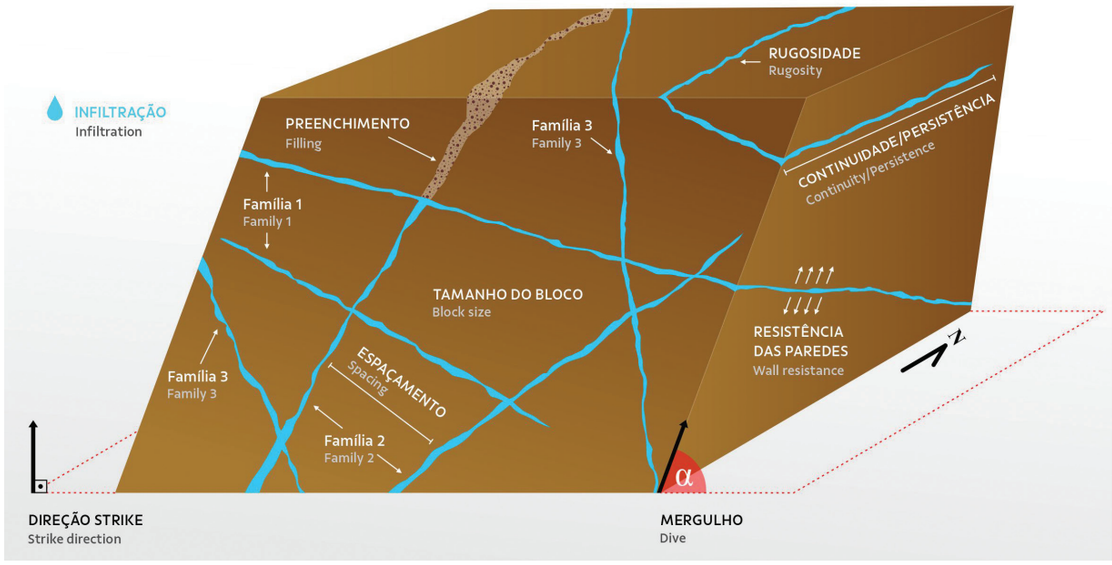


Figura 2: Principais propriedades das descontinuidades nos maciços rochosos.
Figure 2: Main properties of discontinuities in rock masses.

e fatores externos ou antrópicos. No que diz respeito à qualidade do maciço rochoso, devem ser levados em consideração o tipo de rocha e os processos deposicionais ou metamórficos que originaram a coesão das partículas, tipos de feições primárias e secundárias, bem como a presença de contato geológico ou zona de alteração.

Os tipos de "gatilhos" até então observados em cavernas também dependem dos próprios aspectos morfológicos do maciço rochoso, como a quantidade e a penetrabilidade das descontinuidades presentes, a forma do teto e tamanho de salões sem sustentação (vãos). Fatores climáticos também são extremamente relevantes, pois acarretam uma mudança do regime hídrico e tempo de saturação do maciço onde a caverna está inserida, sendo os períodos chuvosos ou extremos climáticos mais suscetíveis à formação de rupturas. Contribuições externas também influenciam na dinâmica das cavernas, tais quais: a distância entre a cavidade natural subterrânea e frentes de lavra e a influência de agentes propulsores, como por exemplo, uma detonação não controlada ou o movimento de máquinas pesadas em seu entorno.

3.1 Fatores e mecanismos de ruptura a serem avaliados

Levando em consideração os principais estudos acerca deste tema, existem alguns mecanismos que podem ocorrer de maneira independente ou associados entre si, sem sequência cronológica predefinida (Barbosa *et al*. 2019). Estes mecanismos ***são*** diretamente responsáveis pelos impactos observados no interior de uma caverna associada à formação ferrífera sob influência de atividade minerária, listados a seguir: fragmentação, desabamentos, reativação de descontinuidades e movimentação de estruturas.

3.1.1 Fragmentação

Este mecanismo está fortemente ligado aos processos de intemperismo promovidos pela água em descontinuidades, porque o movimento da água através das descontinuidades diminui a resistência mecânica da rocha gerando pressões neutras e hidrostáticas (Fiori & Carmignani 2009). A fragmentação também depende da exposição da rocha a altas variações de umidade relativa e temperatura dentro da caverna. A variação da umidade está relacionada a vários aspectos como a espessura do teto (quanto menor a espessura do teto maior será a variação), tamanho da caverna, quantidade e tamanho das entradas e a sua própria morfologia. Longos períodos de exposição das partes

physical-chemical characteristics of the environment, while others are external or anthropic. Consideration must also be paid to the quality of the rock mass itself, such as the type of rock and the depositional or metamorphic processes that originated the cohesion of the particles, the types of primary and secondary features, and the presence of geological contact or an alteration zone.

The types of "triggers" observed in caves so far also depend on the morphological aspects of the rock mass, such as the quantity and penetrability of the discontinuities present, the shape of the ceiling and the size of unsupported halls (spans). Climatic factors are also extremely relevant, as they lead to a change in the water regime and the saturation time of the mass where the cave is located, with rainy periods or extreme weather conditions being more susceptible to the formation of ruptures. External contributions also influence the dynamics of caves, such as the distance between a natural cave and mining fronts and the influence of propelling agents, such as uncontrolled detonations or movements of heavy machinery in the surrounding area.

3.1 Factors and mechanisms of rupture to be assessed

The main studies on this topic show that some mechanisms can occur independently or in association with others, without a predefined chronological sequence (Barbosa *et al*. 2019). The following mechanisms are directly responsible for the impacts observed inside caves associated with a ferriferous formation under the influence of mining activity: fragmentation, collapse, discontinuity reactivation and movement of structures.

3.1.1 Fragmentation

The mechanism of fragmentation is strongly linked to weathering processes promoted by water in discontinuities, because the movement of water through discontinuities reduces the mechanical resistance of the rock, generating neutral and hydrostatic pressures (Fiori & Carmignani 2009). Fragmentation also depends on the exposure of the rock to high variations in relative humidity and temperature inside the cave. Variation in humidity is related to several aspects, such as ceiling thickness (the thinner the ceiling, the greater the variation), cave size, number and size of entrances, and the morphology of the cave. Long periods of exposure of the internal parts of

internas do maciço à umidade são evidenciados pela formação de uma "pátina" em espeleotemas, comumente chamada de "crosta". No geral, a qualidade geomecânica das rochas dentro da caverna é inferior à qualidade da rocha no maciço devido à sua exposição à umidade, que provoca o intemperismo e a dissolução e, consequentemente, a fragmentação do maciço a partir das descontinuidades pré-existentes.

O mecanismo de fragmentação também pode ser facilitado dependendo da composição do material. Por exemplo: materiais argilosos são menos coesos e, portanto, oferecem menor resistência a esforços. Em cavernas ferríferas, os tetos, paredes e rodapés tendem a acumular material argiloso, especialmente no contato entre a crosta laterítica detrítica que suporta o teto e a formação ferrífera bandada. Este processo resulta na formação de cones de deposição de sedimentos e ocasiona a queda de pequenos seixos e fragmentos. A progressiva deposição desse material argiloso dá origem a zonas fragilizadas mais suscetíveis a desplacamentos.

3.1.2 Desabamentos

Ocorrem devido a mudanças de tensão na rocha que levam a movimentação de blocos separados por descontinuidades. A interseção entre duas descontinuidades ou mais será responsável pela formação de blocos, cuja forma e dimensão serão determinados pelo número, tamanho e orientação destas estruturas. Neste caso, a instabilidade geralmente ocorre devido à perda de atrito entre os blocos, mesmo que o material rochoso seja coeso, que aliada à componente gravitacional, pode induzir a instabilidade levando ao colapso de blocos e/ou lajes oriundos, principalmente, do teto das cavernas. A percolação de fluidos ou mesmo a variação da temperatura são fatores naturais que também favorecem os desabamentos, assim como a geomorfologia da área em que a cavidade está inserida, sendo que cavernas inseridas na formação ferrífera alojadas próximo a topo de colinas estão mais propensas a deslocamento de blocos perto de entradas por ação gravitacional. Ações antrópicas também podem desencadear este processo como, por exemplo, vibrações oriundas de detonações de uma frente de lavra.

3.1.3 Reativação de Descontinuidades

Grande parte das cavernas em formações ferríferas possui um condicionamento estrutural preferencial. Por vezes, o eixo de maior desenvolvimento da cavidade ocorre subordinadamente a descontinuidades locais e/ou regionais. Estas estruturas

a rock mass to humidity are evidenced by the formation of a "patina" in speleothems, commonly called "crust". In general, the geomechanical quality of the rocks inside a cave is inferior to the quality of the rock in the mass itself due to exposure to humidity, which causes weathering and dissolution and, consequently, the fragmentation of the mass from pre-existing discontinuities.

The mechanism of fragmentation can also be facilitated depending on the composition of the material. For example, clayey materials are less cohesive and therefore offer less resistance to stress. In ferriferous caves, the ceilings, walls and baseboards tend to accumulate clayey material, especially where the detrital lateritic crust that supports the ceiling contacts the banded iron formation. This process results in the formation of cones of sediment deposition and causes small pebbles and fragments to fall. The progressive deposition of this clayey material gives rise to weakened zones that are more susceptible to displacement.

3.1.2 Collapse

Collapses occur due to changes in stress in the rock that lead to the movement of blocks separated by discontinuities. The intersection between two or more discontinuities will be responsible for the formation of blocks, whose shape and dimension will be determined by the number, size and orientation of these structures. In this case, instability generally occurs due to the loss of friction between blocks, even if the rock material is cohesive, which, combined with the gravitational component, can induce instability leading to the collapse of blocks and/or slabs originating mainly from the ceiling of caves. The percolation of fluids or even variations in temperature are natural factors that also favor collapses, as does the geomorphology of the area in which the cave is located, with caves located in ferriferous formations near the top of hills being more prone to the displacement of blocks near the entrances due to gravitational action. Anthropogenic actions, such as vibrations resulting from detonations at a mining front, can also trigger this process.

3.1.3 Discontinuity Reactivation

Most caves in ferriferous formations have a preferential structural conditioning. Sometimes, the axis of greatest development of a cave occurs subordinate to local and/or regional discontinuities. These structures are mapped

são mapeadas como planos de descontinuidade (Figura 3), representadas por fraturas, falhas, juntas, acamamento ou contatos litológicos. A interseção de descontinuidades cria as chamadas cunhas de rocha que, dependendo do posicionamento, podem soltar-se do teto e das paredes das cavidades. Os planos de fraqueza da rocha associados à inclinação do pacote rochoso (devido ao ângulo de mergulho da foliação ou acamamento sedimentar), também podem resultar em quedas de blocos ou fragmentos. Nestas condições, as descontinuidades formam-se a partir de feições geológicas como veios, dobras e bandamento em rochas metamórficas, fraturas em itabiritos ou jaspilitos, ou descontinuidades sedimentares da canga laterítica.

3.1.4 Movimentação de Descontinuidade Aberta

Este mecanismo está ligado à gênese das cavernas e aos aspectos geomorfológicos de modelagem da paisagem, com aprofundamento dos vales e regressão dos relevos. As descontinuidades abertas ocorrem como fraturas paralelas às margens do platô na superfície e também no interior das cavidades, particularmente perto da borda superior das entradas. São conhecidas como juntas de alívio ou rachaduras de tensão, caracterizadas como estruturas não tectônicas, pouco penetrativas, comumente observadas na crosta laterítica. Estão associadas a condições de clima tropical (chuvas intensas

as discontinuity planes (Figure 3), represented by fractures, faults, joints, layering or lithological contacts. The intersection of discontinuities creates the so-called rock wedges that, depending on their positioning, can detach from the ceiling and walls of caves. The planes of weakness in the rock associated with the inclination of the rock package (due to the dip angle of the foliation or sedimentary layering) can also result in the fall of blocks or fragments. Under these conditions, discontinuities are formed from geological features such as veins, folds and banding in metamorphic rocks; fractures in itabirites or jaspilites; or sedimentary discontinuities of lateritic canga.

3.1.4 Open Discontinuity Movement

The mechanism of open discontinuity movement is linked to the genesis of caves and to geomorphological aspects of landscape modeling, with deepening of valleys and regression of relief. Open discontinuities occur as fractures parallel to the plateau margins on the surface and inside caves, particularly near the upper edge of entrances. They are known as relief joints or tension cracks, characterized as non-tectonic, poorly penetrative structures, commonly observed in lateritic crust. They are associated with tropical climate conditions (heavy rainfall and high temperatures) and lateritization processes. The

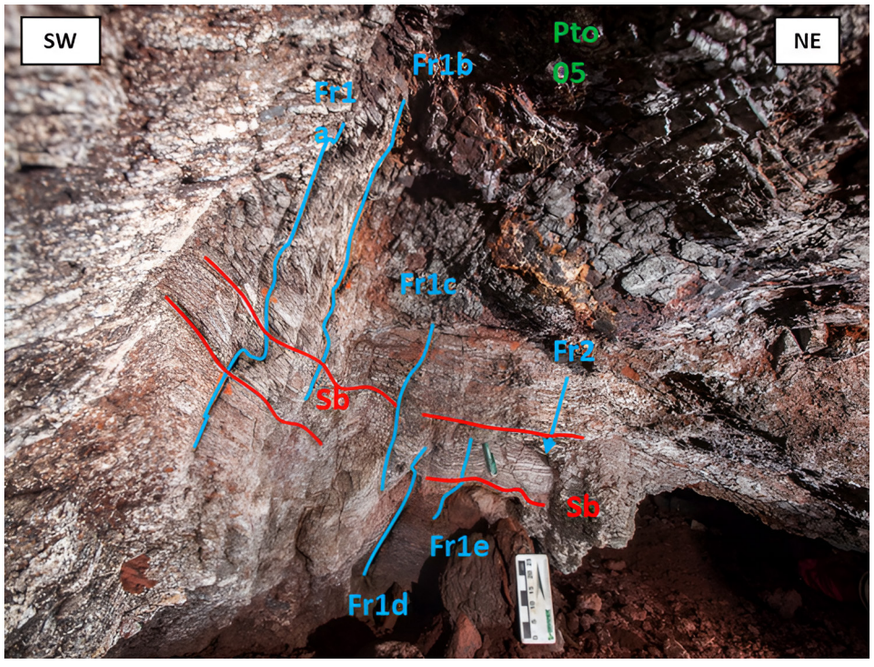


Figura 3: Detalhe de planos de descontinuidades mapeados no interior de cavernas inseridas na formação ferrífera.
Figure 3: Detail of discontinuity planes mapped inside caves inserted in ferriferous formations.

e altas temperaturas) e a processos de lateritização. A abertura ou fechamento progressivo dessas descontinuidades ocorre na superfície rígida da crosta laterítica devido a variações diárias e sazonais de temperatura e umidade, acompanhada da ausência de suporte das entradas devido à erosão remontante (tetos suspensos). O comportamento rúptil da canga favorece o movimento dessas descontinuidades, caso seja atingida por vibrações de ondas sísmicas advindas de detonações nas proximidades do maciço.

3.2 O índice geotécnico de cavidades (igc) como ferramenta para o monitoramento

O IGC (Brandi *et al*. 2020) corresponde a uma importante metodologia de avaliação de susceptibilidade a colapsos nos vãos em cavernas em litologias ferríferas, servindo como ferramenta valiosa para a classificação geomecânica de maciços rochosos e seu monitoramento geoestrutural. Este índice é produto de estudos cujos dados foram obtidos em cerca de 500 vãos analisados em aproximadamente 100 cavernas das regiões de Carajás, no estado do Pará (Barbosa *et al*. 2019), e no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais (Brandi *et al*. 2019). Com base nos resultados obtidos, os autores estabeleceram critérios de avaliação coerentes com análises de riscos pertinentes às operações de lavra em áreas com grande número de cavernas, algumas das quais extremamente significativas para a conservação e consideradas de máxima relevância.

Conceitualmente, Brandi *et al*. (2020) propõem esse índice baseado na relação direta entre quatro variáveis setorizadas, considerando o "vão" como unidade de análise. Ou seja, a cavidade natural subterrânea é compartimentada em setores com características semelhantes e as respectivas variáveis de cada um destes "vãos" são classificadas separadamente. As variáveis levadas em consideração para análise do IGC correspondem ao *Rock Mass Rating* – RMR (classe geomecânica), raio hidráulico (condição de suporte efetivo), forma e espessura do teto conforme detalhado a seguir.

3.2.1 Rock Mass Rating – RMR

Segundo Jordá-Bordedhore (2016), é mais fácil e eficiente usar gráficos empíricos e classificações geomecânicas para avaliar a estabilidade de uma caverna. Quanto melhor a qualidade de um maciço, melhor será a sua estabilidade. Existem vários sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos na literatura (Tabela 1) que têm como objetivo sintetizar e estabelecer uma setorização do maciço rochoso de acordo com

progressive opening or closing of these discontinuities occurs on the rigid surface of the lateritic crust due to daily and seasonal variations in temperature and humidity, accompanied by the lack of support of the entrances due to upwelling erosion (suspended ceilings). The brittle behavior of the canga favors the movement of these discontinuities, if they are hit by vibrations from seismic waves coming from detonations near the mass.

3.2 The cave geotechnical index (cgi) as a tool for monitoring

The CGI (Brandi *et al.* 2020) corresponds to an important methodology for assessing the susceptibility to collapse in cave spans in iron-bearing lithologies, serving as a valuable tool for the geomechanical classification of rock masses and their geostructural monitoring. This index is the product of studies whose data were obtained in approximately 500 spans analyzed in approximately 100 caves in the regions of Carajás, state of Pará (Barbosa *et al.* 2019), and the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais (Brandi *et al.* 2019). Based on the obtained results, the authors established evaluation criteria consistent with risk analyses pertinent to mining operations in areas with numerous caves, some of which are extremely significant for conservation and considered of maximum relevance.

Conceptually, Brandi *et al.* (2020) proposed this index based on the direct relationship between four sectorized variables, considering the "span" as the unit of analysis. In other words, the natural cave is compartmentalized into sectors with similar characteristics and the respective variables of each of these "spans" are classified separately. The variables taken into consideration for CGI analysis correspond to *Rock Mass Rating* (RMR; geomechanical class), hydraulic radius (effective support condition), and ceiling shape and thickness as detailed below.

3.2.1 Rock Mass Rating (RMR)

According to Jordá-Bordedhore (2016), it is easier and more efficient to use empirical graphs and geomechanical classifications to assess the stability of a cave. The better the quality of a rock mass, the better its stability. There are several geomechanical classification systems for rock masses in the literature (Table 1) that aim to synthesize and establish a sectorization of the mass

as suas características geológico-geotécnicas, de modo que seja possível expressar a qualidade de cada um desses setores por meio de classes geotécnicas uniformes. Uma das classificações internacionais mais utilizadas é a *Rock Mass Rating* – RMR (Bieniawski, 1973). Este sistema de classificação ***é*** mundialmente utilizado em diversos setores, seja na mineração, barragens de água, aterros, engenharia civil entre outros, resultando em uma mesma métrica que permite a comparação da qualidade e características entre diferentes materiais.

according to its geological-geotechnical characteristics, so that it is possible to express the quality of each of these sectors through uniform geotechnical classes. One of the most widely used international classifications is the Rock Mass Rating (RMR; Bieniawski, 1973). This classification system is used worldwide in several sectors, such as mining, water dams, landfills and civil engineering, among others, resulting in a single metric that allows the comparison of the quality and characteristics of different materials.

3.2.2 Raio Hidráulico (RH)

Trata-se de uma variável quantitativa contínua selecionada para representar os elementos de suporte efetivo nos vãos das cavernas. Este parâmetro ***é*** obtido pela razão entre a área e o perímetro da seção analisada (Milne, 1997), podendo ser divido em três classes: pequeno, médio e grande (Tabela 2).

3.2.2 Hydraulic Radius (HR)

This is a continuous quantitative variable selected to represent the effective support elements in cave spans. This parameter is obtained as the ratio between the area and the perimeter of the analyzed section (Milne, 1997), and can be divided into three classes: small, medium and large (Table 2).

Tabela 1: Compilação de trabalhos geotécnicos realizados em cavidades subterrâneas naturais ou artificias? e suas respectivas propostas de classificação geomecânica.

Classificação	Referência	Aplicações	Forma e tipo*	Observações
Classificação recomendada de rochas para fins mecânicos	Patching & Coates, 1968	Para entrada em mecânica de rochas	F Descritivo, T Geral	-
Sistema Q	Barton, Lunde & Lien, 1974	Túneis, grandes câmaras	-	-
Sistema RMR (Rock Mass Rating) Sistema CSIR (Council of Scientific & Industrial Research)	Bieniawski, 1973	Túneis, minas, fundações etc.	F Numérico, T Funcional	Registros de casos base não publicados
Concepção em vãos	Noce, 2016	Cavernas	F Descritivo, F Comportamento, T Funcional	Adequado para quaisquer cavernas
Levantamento 3D	Araújo, 2016	Cavernas	F Descritivo, T Geral	Conservador
Sistema RQD (Rock Quality Designation)	Valentin, 2016	Cavernas	F Descritivo, F Comportamental, Conceito de tunelamento	Utilizado em condições de aperto do solo
Índice Geotécnico de Cavernas	Brandi, 2018	Cavernas ferríferas	F Descritivo, T Geral	Baseado em RMR e Laubsher
Sistema RMi (Rock Mass Index)	Oliveira, 2020	Cavernas ferríferas	F Numérico, T Funcional	-
Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha (SMDR)	Fernandes, 2020	Cavernas ferríferas	F Descritivo, T Geral	Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha – SMDR

Table 1: Compilation of geotechnical work carried out in natural or artificial caves and their respective geomechanical classification proposals.

Classification	Reference	Applications	Shape and type*	Observations
Recommended classification of rocks for mechanical purposes	Patching & Coates, 1968	For entry into mechanics of rocks	Descriptive F, General T	–
Q System	Barton, Lunde & Lien, 1974	Tunnels, large chambers	–	–
RMR System (Rock Mass Rating) CSIR System (Council of Scientific & Industrial Research)	Bieniawski, 1973	Tunnels, mines, foundations, etc.	Numerical F, Functional T	Unpublished base case records
Conception in spans	Noce, 2016	Caves	Descriptive F, Behavior F, Functional T	Suitable for any cave
3D Survey	Araújo, 2016	Caves	Descriptive F, General T	Conservative
RQD System (Rock Quality Designation)	Valentin, 2016	Caves	Descriptive F, Behavior F, Tunneling concept	Used in tight soil conditions
Cave Geotechnical Index	Brandi, 2018	Ferriferous caves	Descriptive F, General T	Based on RMR and Laubsher
RMi System (Rock Mass Index)	Oliveira, 2020	Ferriferous caves	Numerical F, Functional T	–
Rock Dynamics Monitoring System (RDMS)	Fernandes, 2020	Ferriferous caves	Descriptive F, General T	Rock Dynamics Monitoring System – RDMS

Tabela 2: Faixas estatísticas para as classes de raio hidráulico (Brandi, 2018).
Table 2: Statistical ranges for hydraulic radius classes (Brandi, 2018).

Classe Class	Limite (m) Limit (m)
Pequeno RH Small HR	0,00 – 0,91
Médio RH Regular HR	0,92 – 1,82
Grande RH Large HR	1,83 – 3,0

3.2.3 Forma do Teto (FT)

A morfologia do teto influencia diretamente no nível de instabilidade de vãos subterrâneos, que geralmente está associada a formas retas (planas) ou arqueadas (abóbadas). Desse modo, as formas de teto podem ser classificadas em três tipos: abóbada, planar e abóboda invertida (Figura 4). Tetos abobadados são menos suscetíveis à alteração física do que tetos em forma de abóbada invertida. Tetos planos possuem suscetibilidade intermediária.

3.2.3 Ceiling Shape (CS)

The morphology of the ceiling directly influences the level of instability of subterranean spans, which is generally associated with straight (planar) or arched (vaulted) shapes. Thus, ceiling shapes can be classified into three types: arch, planar and inverted arch (Figure 4). Arch ceilings are less susceptible to physical changes than inverted vault ceilings, while flat ceilings have intermediate susceptibility.

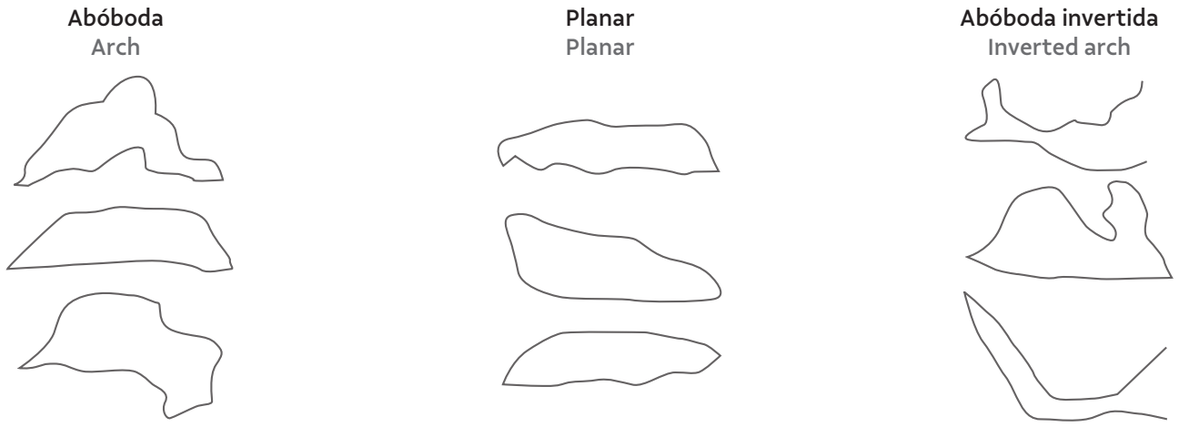


Figura 4: Seções tipo das classes de forma do teto (Brandi, 2018).
Figure 4: Type sections of ceiling shape classes (Brandi, 2018).

3.2.4 Espessura do Teto (ET)

Este parâmetro apresenta uma relação inversamente proporcional com o grau de instabilidade de cavernas; e pode ser divido em três classes (Tabela 3): pequena, regular e grande. Por exemplo, em se tratando de cavernas rasas, quanto mais próximo à superfície, menor a espessura do teto e maior o grau de instabilidade. Isso porque tetos pouco espessos (pequena espessura) estão mais suscetíveis à ruptura. Portanto, à medida que a espessura aumenta, o vão se torna menos vulnerável.

3.2.4 Ceiling Thickness (CT)

This parameter presents an inversely proportional relationship with the degree of cave instability and can be divided into three classes (Table 3): small, regular and large. For example, in the case of shallow caves, the closer to the surface, the smaller the thickness of the ceiling and the greater the degree of instability. This is because thin ceilings (small thickness) are more susceptible to rupture. Therefore, as thickness increases, the span becomes less vulnerable.

Tabela 3: Faixas estatísticas para as classes de espessura de teto de cavidades subterrâneas (Brandi, 2018).
Tabela 3: Statistical ranges for thickness classes of cave ceilings (Brandi, 2018).

Classe Class	Limite (m) Limit (m)
Pequena Small	0,00 – 3,31
Regular Regular	3,32 – 7,64
Grande Large	7,65 – 10,0

3.2.5 Classificação IGC

Conforme a metodologia, cada variável mencionada acima deve ser avaliada e um fator de relevância deve ser atribuído ao vão da cavidade natural subterrânea analisada, conforme a classe designada (Tabela 4). A partir da soma dos fatores RMR, Raio Hidráulico, Espessura do Teto e Forma do Teto, obtém-se o IGC que expressa o nível de suscetibilidade à alteração física em que a estrutura está submetida (Tabela 5). O IGC varia de 0 a 100 e possui cinco classes de interpretação, sendo que, quanto menor o valor do IGC (mais próximo de zero), mais susceptível à instabilidade está o vão analisado.

3.2.5 CGI Classification

According to the methodology, each variable mentioned above must be evaluated and a relevance factor must be assigned to the span of the analyzed cave, according to the designated class (Table 4). The CGI is obtained from the sum of the RMR, Hydraulic Radius, Ceiling Thickness and Ceiling Shape factors, which expresses the level of susceptibility to physical alteration to which the structure is subjected (Table 5). Values for the CGI vary from 0 to 100 and there are five interpretation classes, with the lower the CGI value (closer to zero), the more susceptible to instability is the analyzed span.

Tabela 4: Pesos atribuídos ao Índice Geotécnico de Cavernas (adaptado de Brandi, 2018).
Table 4: Weights assigned to the Cave Geotechnical Index (adapted from Brandi, 2018).

Variáveis Variables	Classes Classs	Limites das classes Class limits		Fator para soma no IGC Factor for summation in CGI
		Inferior Lower	Superior Upper	
RMR RMR	Maciço rochoso muito pobre Rock mass very poor	0	20	0
	Maciço rochoso pobre Rock mass poor	21	40	15
	Maciço rochoso regular Rock mass regular	41	60	30
	Maciço rochoso bom Rock mass good	61	80	45
	Maciço rochoso muito bom Rock mass very good	81	100	60
Raio hidráulico Hydraulic radius	Pequeno Small	0	0,91	25
	Médio Medium	0,92	1,82	15
	Grande Large	1,83	3,00	0
Espessura do teto Ceiling thickness	Pequena Small	0	3,31	0
	Regular Regular	3,32	7,64	2
	Grande Large	7,65	10,00	5
Forma do teto Ceiling shape	Abóbada Arch	–	–	10
	Planar Planar	–	–	4
	Abóbada invertida Inverted arch	–	–	0

Tabela 5: Classes de suscetibilidade a instabilidade estrutural do vão consideradas para o IGC (adaptado de Brandi, 2018).
Table 5: Classes of susceptibility to structural instability of spans considered for the CGI (adapted from Brandi, 2018).

Suscetibilidade Susceptibility	Intervalo do Fator do IGC CGI factor range	Interpretação da classe do vão Interpretation of span class
Muito baixa Very low	IGC > 80	Condições de estabilidade favorecidas. Favored stability conditions.
Baixa Low	60 < IGC ≤ 80	Estabilidade geotécnica suscetível se submetido a esforços não controlados. Geotechnical stability susceptible if subjected to uncontrolled stresses.
Moderada Moderate	40 < IGC ≤ 60	Condições de estabilidade moderadas com possibilidade de alterações físicas localizadas. Moderate stability conditions with the possibility of localized physical changes.
Alta High	20 < IGC ≤ 40	Estabilidade comprometida por influência de esforços externos, pertinentes a ações antrópicas e/ou forças não cotidianas da natureza. Stability compromised by the influence of external forces, related to human actions and/or non-everyday forces of nature.
Muito alta Very high	IGC ≤ 20	Estabilidade altamente comprometida, alta densidade de pontos frágeis, sujeitos a alterações físicas localizadas, influenciadas por ações externas ou naturais. Highly compromised stability, high density of fragile points, subject to localized physical changes, influenced by external or natural actions.

4 MODELO ATUAL DE MONITORAMENTO DE CAVIDADES NATURAIS SUBTERRRÂNEAS A PARTIR DA CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O IGC – ESTUDOS DE CASO

Atualmente existem mais de uma centena de cavernas sendo monitoradas do ponto de vista geoestrutural e geomecânico na região da Serra dos Carajás, no estado do Pará, e outras dezenas na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais. A metodologia empregada no programa de monitoramento é baseada na classificação das cavidades segundo o IGC, cujo objetivo é avaliar a vulnerabilidade das cavernas ferríferas e categorizar aquelas que precisam ser monitoradas com maior atenção, isto é, que possuem maiores riscos de apresentar desplacamentos naturais.

Tendo em vista que o IGC é uma metodologia que vem sendo aplicada nos últimos anos, serão apresentados dois estudos de caso de modo a exemplificar de maneira prática o emprego do IGC associado ao monitoramento das cavidades. Os estudos de caso são referentes à cavidade natural subterrânea N4E_0026, localizada na Serra dos Carajás, o qual embasou toda a metodologia atualmente utilizada para monitoramento geoestrutural; e o exemplo de monitoramento da cavidade MDIR_0028, localizada no Quadrilátero Ferrífero – MG, mostrando as boas práticas atualmente adotadas.

É importante ressaltar que o IGC entrega uma classificação com base nos elementos naturais das cavidades subterrâneas, isto é, não leva em consideração fatores externos às cavidades.

4.1 Serra dos carajás – estudo de caso da cavidade N4E_0026

A seguir, descreve-se o estudo de caso da cavidade natural subterrânea N4E_0026 (Figura 5) situada no contexto da mina de Ferro N4EN da Vale S.A., na região sudeste do estado do Pará (Norte do Brasil). Neste caso, trata-se de uma cavidade natural subterrânea classificada como de alta relevância espeleológica no âmbito do licenciamento ambiental do projeto Serra Norte, um dos mais importantes empreendimentos do Brasil para a produção de minério de ferro. Esta caverna foi devidamente autorizada para supressão e compensada, conforme estabelecia o Decreto Federal nº 6.640, de novembro de 2008 (vigente à época), sendo, portanto, uma excelente oportunidade para uma avaliação experimental da resiliência de cavernas de minério de ferro frente ao avanço de implantação e operação de uma frente de lavra.

4 CURRENT MODEL FOR MONITORING NATURAL CAVES BASED ON CGI CLASSIFICATION – CASE STUDIES

Over one-hundred caves are currently being monitored from a geostructural and geomechanical point of view in the Serra dos Carajás region, state of Pará, and dozens more in the Quadrilátero Ferrífero region, state of Minas Gerais. The methodology used in the monitoring program is based on the CGI classification of the caves, with the objective of assessing the vulnerability of ferriferous caves and categorizing those that need to be monitored more closely, that is, those that with greater risk of natural displacement.

Considering that the CGI is a methodology that has been applied in recent years, two case studies will be presented to exemplify, in a practical way, its use in cave monitoring. The case studies refer to cave N4E_0026, located in Serra dos Carajás, which was based on all the methodology currently used for geostructural monitoring; and cave MDIR_0028, located in Quadrilátero Ferrífero, showing the good practices that are currently adopted.

It is important to highlight that the CGI delivers a classification based on the natural elements of caves, that is, it does not take into account external factors.

4.1 Serra dos carajás – case study of cave N4E_0026

The following is a case study of cave N4E_0026 (Figure 5) located in the context of the N4EN iron mine of Vale S.A., in the southeastern region of the state of Pará (North Brazil). This cave is classified as of high speleological relevance within the scope of the environmental licensing of the Serra Norte project, one of the most important iron ore production projects in Brazil. The cave was duly authorized for suppression and compensation, as established by Federal Decree 6.640, of November 2008 (in force at the time), and is therefore an excellent opportunity for an experimental evaluation of the resilience of ferriferous caves in the face of the advancement of the implementation and operation of a mining front.

A cavidade N4E_0026 fazia parte de um projeto piloto para acompanhamento de sua supressão. O seu monitoramento ocorreu durante quatro anos e foi realizado desde o seu estado em equilíbrio natural (sem influência de atividades mineradoras) seguindo, concomitantemente, ao avanço controlado da frente de lavra (avanço controlado de 50 em 50 metros; Figura 6), até a ocorrência de colapso total com a supressão da caverna.

4.1.1 Diagnóstico Geoestrutural

O conjunto de dados apresentados e discutidos nesse estudo de caso inclui a topografia de detalhe, a instrumentação geotécnica e sismográfica remota, levantamentos geofísicos e mapeamentos geomecânicos. Levando-se em consideração que desmontes com explosivos (detonação) na mineração podem

cave N4E_0026 was part of a pilot project to monitor its suppression. It was monitored for four years, from its natural equilibrium state (without the influence of mining activities) through, simultaneously, the controlled advance of the mining front (controlled advance every 50 meters; Figure 6), until the occurrence of total collapse with cave suppression.

4.1.1 Geostructural Diagnosis

The dataset presented and discussed in this case study includes detailed topography, geotechnical and remote seismographic instrumentation, geophysical surveys and geomechanical mapping. Considering that blasting in mining

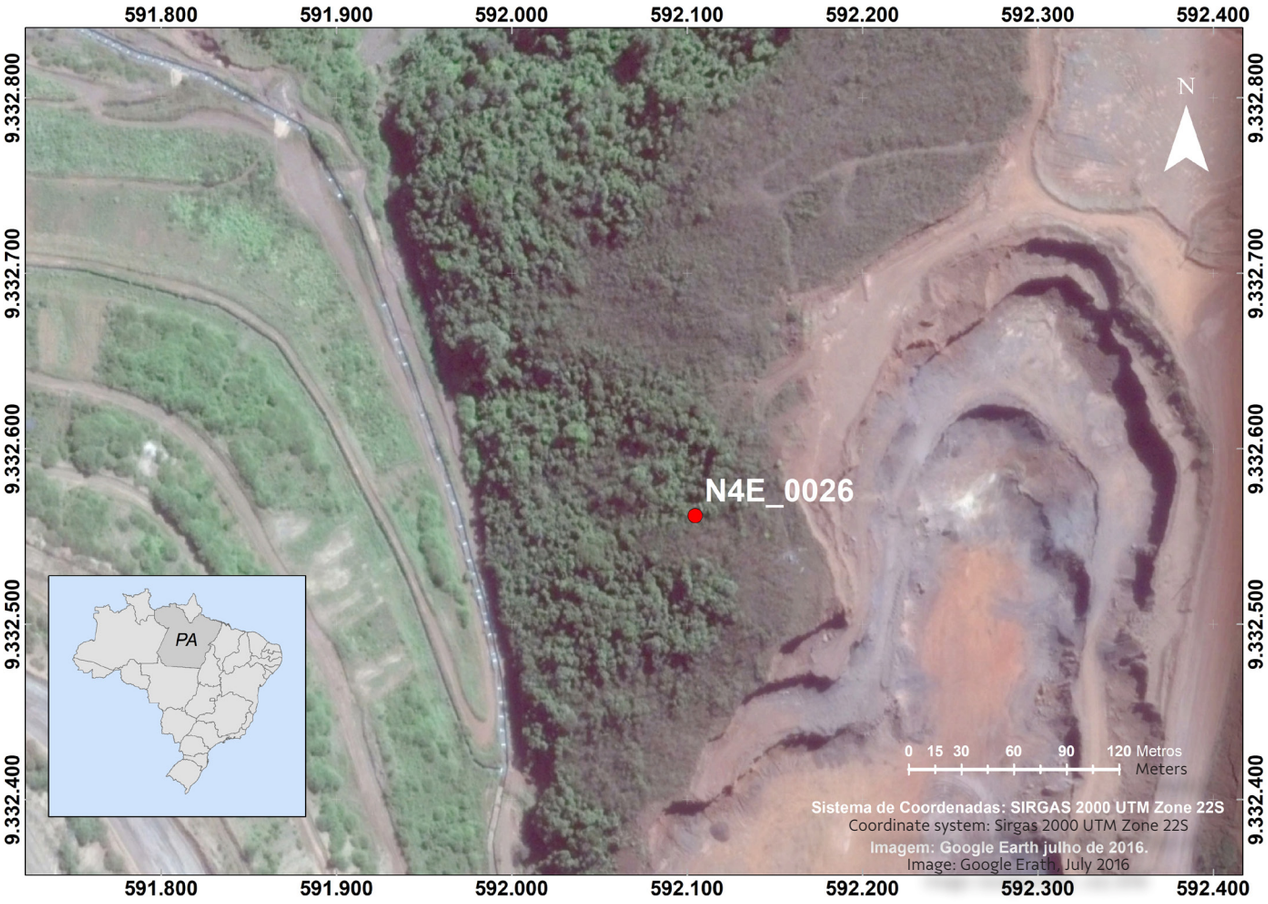


Figura 5: Localização da cavidade natural subterrânea N4E_0026, região de Carajás, município de Parauapebas, estado do Pará.
Figure 5: Location of cave N4E_0026, Serra dos Carajás region, municipality of Parauapebas, state of Pará.



Figura 6: Localização da cavidade natural subterrânea N4E_0026 na mina N4EN em foto aérea antes da sua supressão. As linhas tracejadas demostram os limites aproximados do avanço de lavra controlado.
Figure 6: Aerial photo showing the location of cave N4E_0026 in the area of N4EN mine before its suppression. The dashed lines show the approximate limits of the controlled mining advance.

induzir desmoronamentos em uma caverna, os estudos e modelagem de qualidade geomecânica desempenham um papel fundamental na determinação do tamanho da zona tampão como área de proteção ao redor da cavidade, bem como–na observação dos mecanismos de quebra causados a partir do conceito de "ruptura de cavernas" de White (2012) e Osborne (2002).

4.1.1.1 Mapeamento Topográfico

O mapeamento topográfico da cavidade N4E_0026 foi realizado a partir de perfilamento a laser com a tecnologia *Ligh Detection and Ranging* – LiDAR, para obtenção de medidas altimétricas e planimétricas das feições presentes no terreno. Para o georreferenciamento dos pontos, foi acoplado ao

can inducing cave collapses, geomechanical quality studies and modeling play a fundamental role in determining the size of a buffer zone as a protective area around a cave, as well as in observing the failure mechanisms caused by the concept of "cave rupture" of White (2012) and Osborne (2002).

4.1.1.1 Topographic Mapping

Topographic mapping of cave N4E_0026 was performed using laser profiling with *Light Detection and Ranging* (LiDAR) technology to obtain altimetric and planimetric measurements of terrain features. Points were georeferenced using a *Global Navigation Satellite of Systems* (GNSS) receiver coupled to a

sensor o receptor *Global Navigation Satellite of Systems* – GNSS, responsável pela coleta das coordenadas geográficas. A junção de todos os pontos medidos com as suas respectivas coordenadas gera uma nuvem de pontos que, após o tratamento de dados, forneceu vários produtos importantes para os estudos espeleológicos, como o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE), Modelo de Elevações do Teto das Cavidades para cada vão, a geração de malha 3D (Figura 7), o cálculo da área e volume e as informações litoestruturais.

4.1.1.2 Mapeamento Geológico

O contexto geológico da área (Figura 8) compreendia as formações ferríferas ou jaspilitos (em maiores profundidades) alojados em rocha máfica com camada mergulhando para oeste. A formação ferrífera bandada apresentava foliação geral com atitude N40W/60NE e localmente dobras tipo *kink*. Os níveis de hematita friável estavam por vezes associados à hematita manganesífera e eram encontrados intercalados com jaspilitos formando um contato brusco. As sequências estavam cortadas por diques e *sills* de composição máfica fortemente intemperizados, além de fraturas N30E/subvertical, E-W/subvertical, N-S/subvertical, fundamentais para a construção do mapa geoestrutural (Figura 9).

4.1.1.3 Diagnóstico Geotécnico e Classificação Geomecânica

A cavidade natural subterrânea N4E_0026 desenvolvia-se ao longo de uma descontinuidade erosiva produzida pelo contato brusco entre a canga e a hematita friável. De maneira geral, a cavidade era rasa, com profundidade média inferior a 10 metros; o teto era composto por canga ou hematita, enquanto as paredes e piso eram predominantemente compostos por hematita; e as descontinuidades foram responsáveis pelo condicionamento das paredes e condutos. A Figura 10 mostra o mapa geomecânico da cavidade natural subterrânea N4E_0026 utilizando três índices geomecânicos distintos.

4.1.1.4 Diagnóstico IGC

A partir da soma dos fatores RMR, Raio Hidráulico, Espessura do Teto e Forma do Teto para a cavidade natural subterrânea N4E_0026, foi elaborado o mapa de risco geotécnico (Figura 11) para mensurar a fragilidade dessa caverna frente ao avanço de lavra controlada.

sensor, responsible for collecting the geographic coordinates. The combination of all the measured points, with their respective coordinates, generates a point cloud that, after data processing, provides several important products for speleological studies, such as the Digital Terrain Elevation Model (DEM), the Ceiling Elevation Model of the Caves for each span, the generation of a 3D mesh (Figure 7), the calculation of area and volume, and lithostructural information.

4.1.1.2 Geological Mapping

The geological context of the area (Figure 8) comprised ferriferous formations or jaspilites (at greater depths) hosted in mafic rock with a westward-dipping layer. The banded ferriferous formation presented a general foliation with a N40W/60NE attitude and locally *kink*-type folds. The friable hematite levels were sometimes associated with manganese hematite and were found intercalated with jaspilites forming a sharp contact. The sequences were cut by strongly weathered dikes and *sills* of mafic composition, in addition to N30E/subvertical, E-W/subvertical, N-S/subvertical fractures, which were fundamental for the construction of the geostructural map (Figure 9).

4.1.1.3 Geotechnical Diagnosis and Geomechanical Classification

Cave N4E_0026 developed along an erosional discontinuity produced by the abrupt contact between the canga and friable hematite. In general, the cave was shallow, with an average depth of less than 10 meters; the ceiling was composed of canga or hematite, while the walls and floor were predominantly composed of hematite; the discontinuities were responsible for the conditioning of the walls and conduits. Figure 10 shows the geomechanical map of cave N4E_0026 using three different geomechanical indices.

4.1.1.4 CGI Diagnosis

A geotechnical risk map (Figure 11) was prepared from the sum of the RMR, Hydraulic Radius, Ceiling Thickness and Ceiling Shape factors for cave N4E_0026, to measure its fragility in the face of controlled mining advancement.

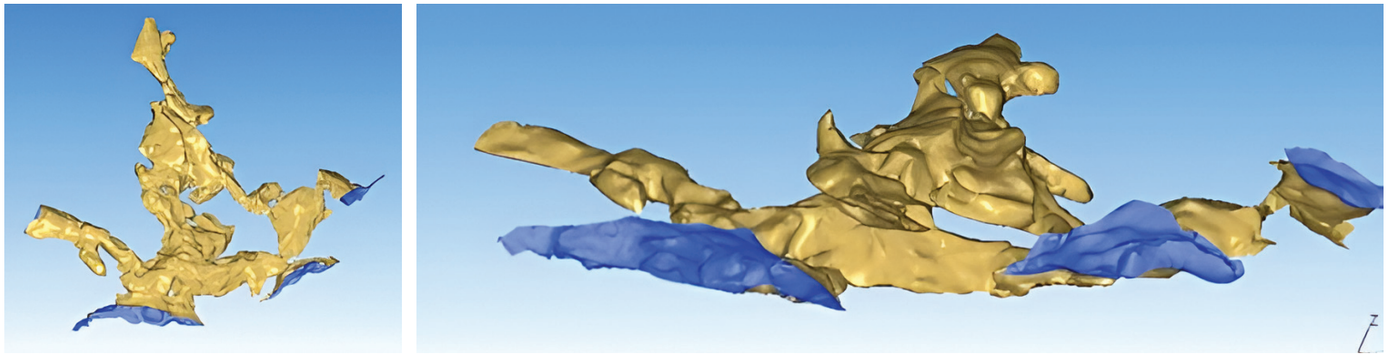


Figura 7: Malha 3D da cavidade natural subterrânea N4E_0026.
Figure 7: 3D mesh for cave N4E_0026.

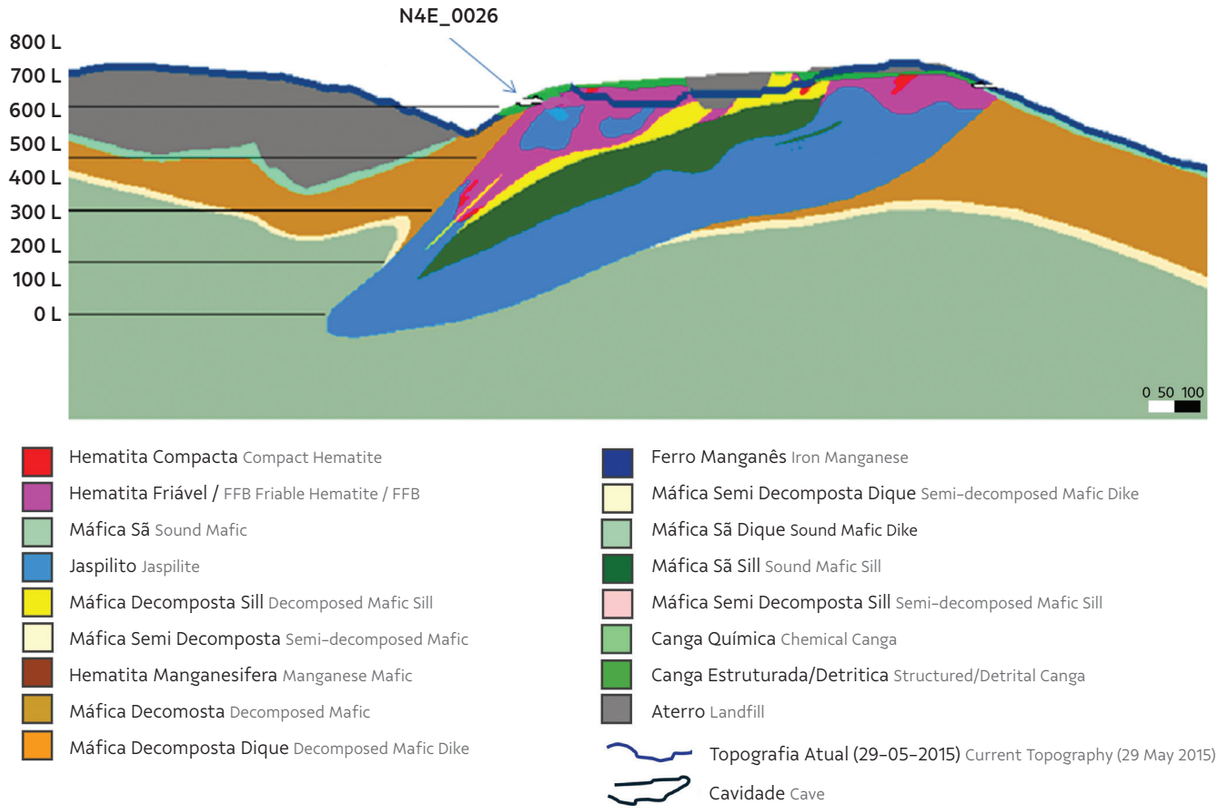


Figura 8: Seção geológica da Mina N4E mostrando a localização da cavidade natural subterrânea N4E_0026 (cota do piso 600 m) acima da cota topográfica da cava (580m).
Figure 8: Geological section of Mine N4EN showing the location of cave N4E_0026 (floor elevation 600 m) above the topographic elevation of the pit (580 m).

4.1.2 Monitoramento

A fase de monitoramento teve seu início em fevereiro de 2014, a partir do avanço sequencial de lavra de 50 em 50 metros, com medição dos parâmetros físicos (temperatura, umidade, deslocamentos e vibrações, entre outros) e acompanhamento da capacidade de resistência da caverna até a sua supressão em março de 2018. O registro dos dados foi feito por instrumentos geotécnicos instalados no interior da cavidade N4E_0026, com transmissão via *web* através de estações de telemetria e repetidoras, que enviavam dados de forma contínua, em tempo real, para o servidor do banco de dados da Vale. Os dados eram recebidos por um *software* especialista (*Vista Data Vision*) que automaticamente tratava e atualizava relatórios e gráficos de controle, disponibilizando os resultados via *internet*. Nos casos de alguma movimentação estrutural discrepante dos valores base previamente definidos, o *software* emitia alertas para os celulares cadastrados. Os principais instrumentos e

4.1.2 Monitoring

The monitoring phase began in February 2014, with sequential mining advances of 50 meters each, with measurements of physical parameters (temperature, humidity, displacements and vibrations, among others) and monitoring of the cave's resistance capacity until its suppression in March 2018. Data was recorded by geotechnical instruments installed inside the cave, with *web* transmission through telemetry stations and repeaters, which sent data continuously, in real time, to Vale's database server. The data was received by specialized *software* (*Vista Data Vision*) that automatically processed and updated reports and control charts, making the results available via the *internet*. The *software* sent alerts to registered cell phones in cases of any structural movement that differed from the previously defined

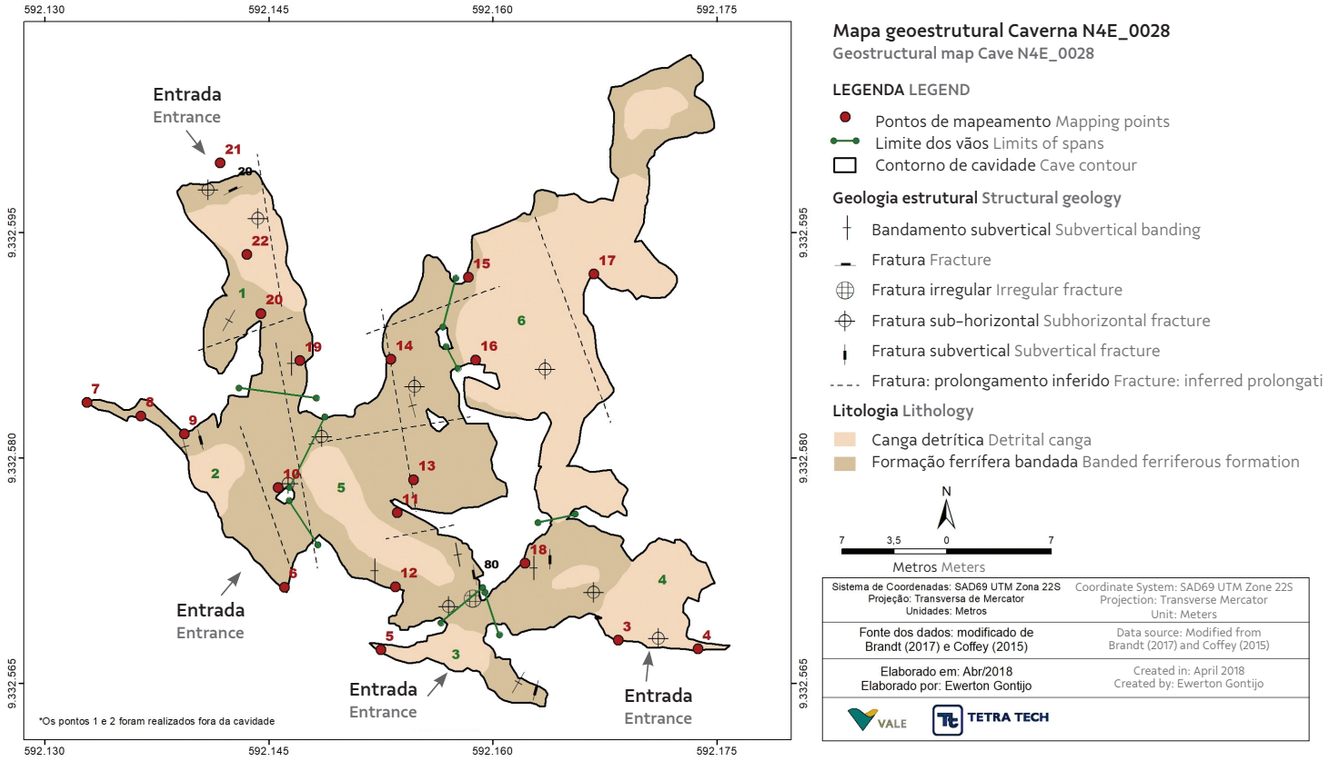


Figura 9: Mapa Geoestrutural da cavidade natural subterrânea N4E_0026.
Figure 9: Geostructural map of cave N4E_0026.

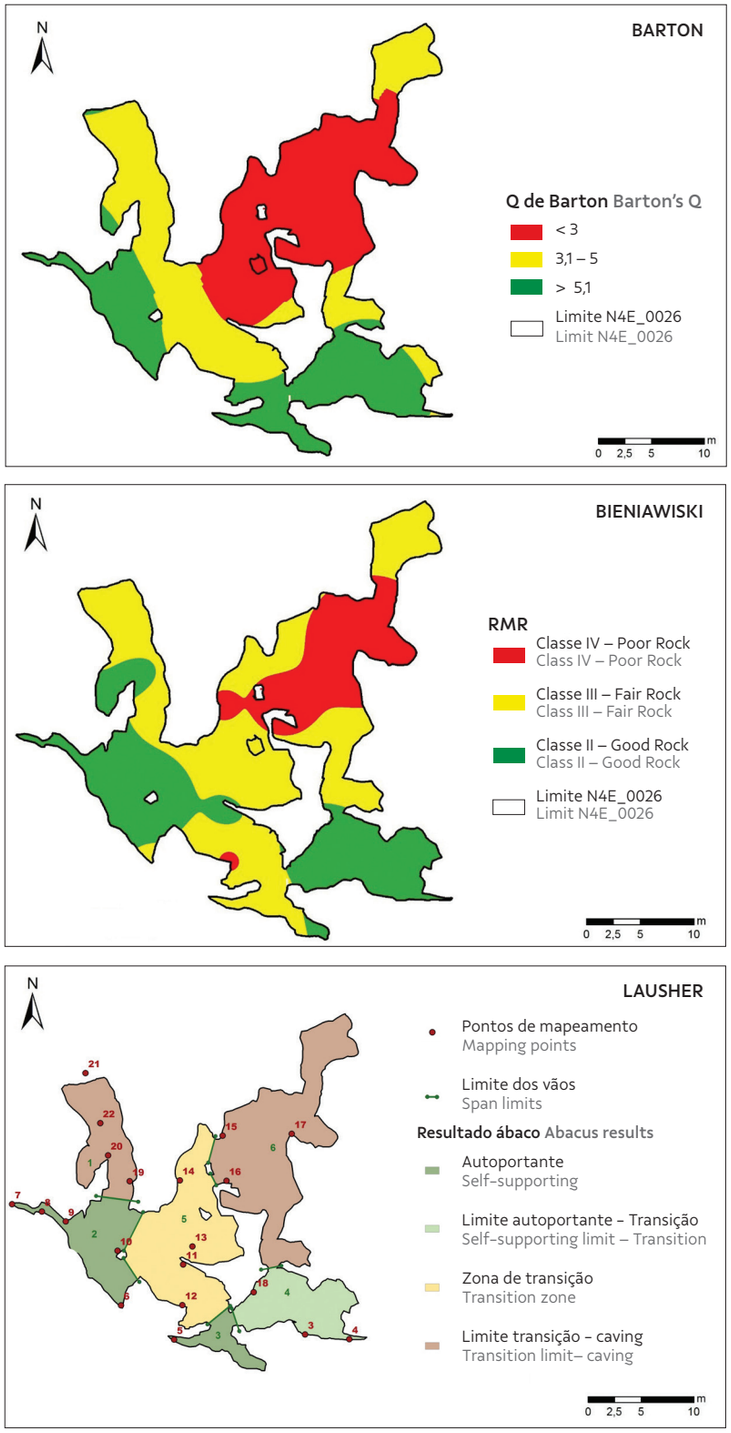


Figura 10: Comparação entre as classificações geomecânicas na cavidade natural subterrânea N4E_0026.
Figure 10: Comparison of geomechanical classifications of cave N4E_0026.

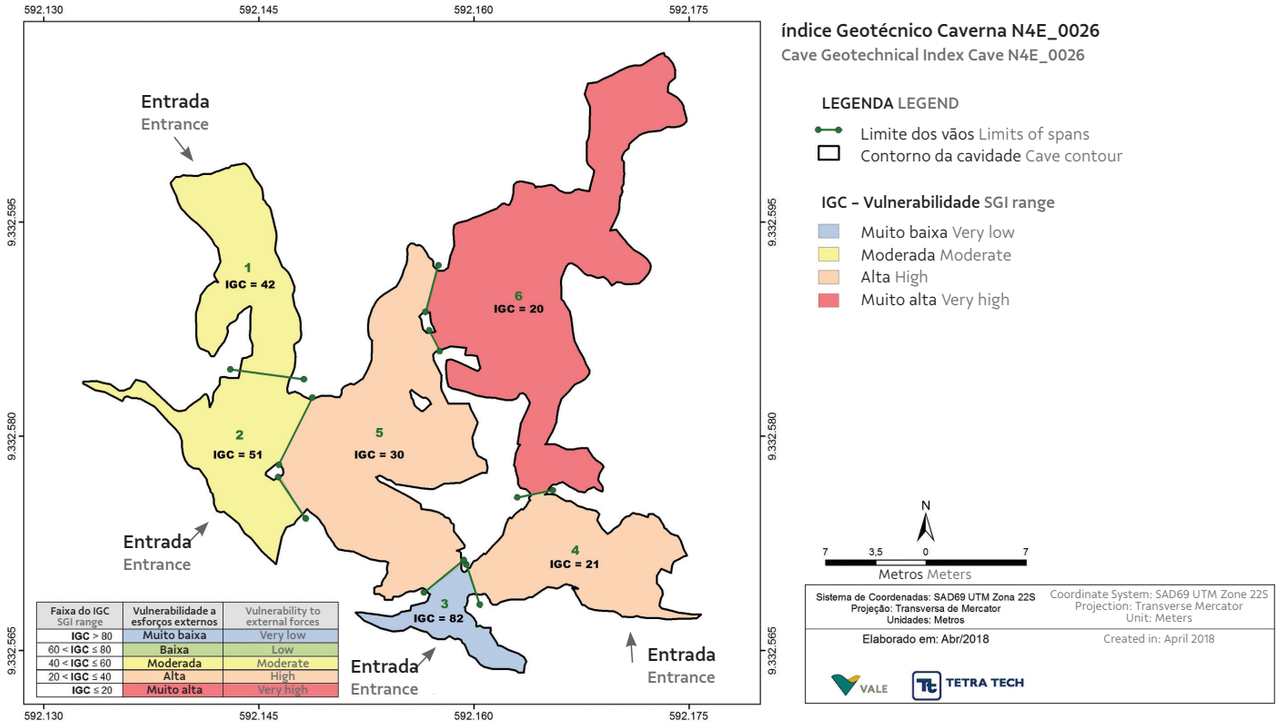


Figura 11: Mapa de IGC para a cavidade natural subterrânea N4E_0026.
Figure 11: CGI map for cave N4E_0026.

equipamentos instalados para a medição dos parâmetros físicos estão listados e explicados a seguir:

- **Medidor de fratura (*Crackmeter*):** registra alteração de qualquer tipo de abertura estrutural. Apropriado para monitorar fendas, fraturas ou fissuras em paredes e tetos rochosos;
- **Medidor de recalque (*Convergence meter*):** registra alteração de qualquer tipo de deformação estrutural vertical. Apropriado para monitorar movimentos de tetos e pisos;
- **Sismógrafo:** registra vibrações sismográficas;
- **Medidor de temperatura e umidade:** equipamento de medição da umidade relativa do ar e da temperatura de um ambiente;
- **Piezômetro:** dispositivo instalado para medição do nível d'água em maciços ou cavidades;
- **Câmera de vídeo *online*:** registra imagens, disponibilizando vídeos em períodos pré-determinados. Muito utilizada para monitoramento de áreas de maior fragilidade.

base values. The main instruments and equipment installed to measure physical parameters are listed and explained below:

- **Crackmeter:** records changes in any type of structural opening. Suitable for monitoring cracks, fractures or fissures in rocky walls and ceilings;
- **Convergence meter:** records changes in any type of vertical structural deformation. Suitable for monitoring movements of ceilings and floors;
- **Seismograph:** records seismographic vibrations;
- **Temperature and humidity meter:** equipment for measuring the relative air humidity and the temperature of an environment;
- **Piezometer:** device installed to measure the water level in masses or cavities;
- **Online video camera:** records images, making videos available at predetermined periods. Widely used for monitoring areas of greater fragility.

Todos os registros de dados foram configurados para fornecer informações a cada 10 segundos. Nas Figuras 12 e 13, a seguir, demonstra-se a utilização destes equipamentos.

Além dos sensores remotos, também foi realizado o monitoramento fotográfico, medições manuais e inspeções visuais à medida que a lavra avançava em direção à caverna. Os monitoramentos manuais foram realizados com paquímetros, além de fotos em pontos determinados para fins de comparação (Figura 14).

4.1.3 Análise dos Resultados e Conclusões do Estudo

Os valores de recalque piso-teto medidos nos *convergence meters* (medidores de convergência) e de deformação nos *crackmeters* (medidores de fratura) instalados na cavidade N4E_0026 demonstraram um comportamento semelhante em duas porções do maciço (teto e parede), com variações de centésimos a milésimos de milímetro. O monitoramento de fratura existente no teto da entrada da cavidade, realizado durante o período de cinco meses, mostrou que os valores de deslocamento apresentaram variação máxima em torno de 0,003 milímetro, indicando que as estruturas ficaram estáveis,

All data recorders were configured to provide information every 10 seconds. Figures 12 and 13 below demonstrate the use of this equipment.

In addition to the remote sensors, photographic monitoring, manual measurements and visual inspections were also carried out as mining progressed towards the cave. Manual monitoring was carried out with calipers, in addition to photographs being taken at specific points for comparitive purposes (Figure 14).

4.1.3 Analysis of the Results and Conclusions of the Study

The floor-to-ceiling settlement values measured by *convergence meters* and the deformation values measured by *crackmeters* installed in cave N4E_0026 demonstrated similar behavior in two portions of the mass (ceiling and wall), with variations of hundredths to thousandths of a millimeter. Monitoring of the fracture in the ceiling of the cave entrance, carried out over a period of five months, showed displacement values with a maximum variation of around 0.003 millimeters, indicating that the structures remained stable, without

Monitoramento Instrumentado Automatizado – Modelo Esquemático (Geral)

Automated Instrumented Monitoring – Schematic Model (General)

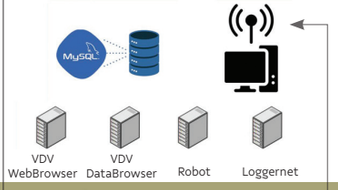
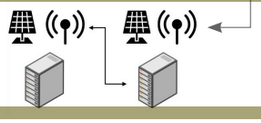
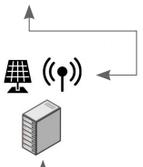
	Componente Component	**Infraestrutura** Infrastructure		**Insumo (ex)** Input (ex)	
Estação de Base Base Station		Infraestrutura de Armazenamento Definitivo	Definitive Storage Infrastructure	Servidores e Sistemas em Ambiente TI e/ ou TA	Servers and Systems in, TI and/or TA Environment
		Infraestrutura de Comunicação – **Recepção**	Communication Infrastructure – Reception	Modems, Antenas...	Modems, Antennas ...
Estação Repetidora Repeater Station		Infraestrutura de Comunicação – **Repetidora**	Communication Infrastructure – Repeater	Antenas	Antennas
Estação de Campo Field Station		Infraestrutura de Armazenamento Temporário	Temporary Storage Infrastructure	*Data loggers*, Multiplexadores, PLCs (TA)...	*Data loggers*, Multiplexers, PLCs (TA) ...
		Infraestrutura de Comunicação – **Transmissão**	Communication Infrastructure – Transmission	Modems, Antenas...	Modems, Antennas ...
Instrumento (Sensor) Instrument (Sensor)				Piezômetro, Inclinômetro...	Piezometer, Inclinometer ...

Figura 12: Esquema de instrumentos e equipamentos utilizados no monitoramento da cavidade natural subterrânea N4E_0026.
Figure 12: Diagram of instruments and equipment used in monitoring cave N4E_0026.



Figura 13: Instrumentação do interior e entorno da cavidade natural subterrânea N4E_0026 mostrando a tecnologia implementada para o monitoramento.
Figure 13: Instrumentation of the interior and surroundings of cave N4E_0026 showing the technology implemented for monitoring.

sem processos de reativação e movimentação no interior da cavidade, mesmo quando as detonações da lavra ocorreram a 75 metros de distância.

Esses pequenos deslocamentos estão associados às variações na temperatura ambiente e, a partir da comparação de dados obtidos em diferentes períodos do dia, observou-se que a diminuição da temperatura provoca um aumento nos valores medidos e vice-versa. Essa diferença foi atribuída à sensibilidade do sensor do equipamento, mais bem observada na Figura 15, que mostra o deslocamento da fratura nos dois períodos e a influência da temperatura ambiente nas medidas obtidas.

A mesma condição de estabilidade foi observada nas medidas de deformação vertical do medidor de recalque *(convergence meter*), confirmando a ausência de movimentação estrutural na cavidade. A Figura 16 traz um gráfico geral para toda a área de lavra no mesmo *crackmeter* instalado na fratura de teto da cavidade N4E_0026, considerando as datas das detonações na Mina N4E e o registro das deformações. O resultado mostra que

reactivation or movement processes inside the cave, even when mining detonations occurred 75 meters away.

These small displacements are associated with variations in ambient temperature. The comparison of data obtained at different times of the day revealed that a decrease in temperature causes an increase in the measured values and vice versa. This difference was attributed to the sensitivity of the equipment sensor, best observed in Figure 15, which shows the displacement of the fracture in the two periods and the influence of ambient temperature on the obtained measurements.

The same stability condition was observed in the vertical deformation measurements of the *convergence meter*, confirming the absence of structural movement in the cave. Figure 16 shows a general graph for the entire mining area according to the same *crackmeter* installed in the ceiling fracture of cave N4E_0026, considering the dates of detonations in mine N4EN and the deformation records. The result shows that

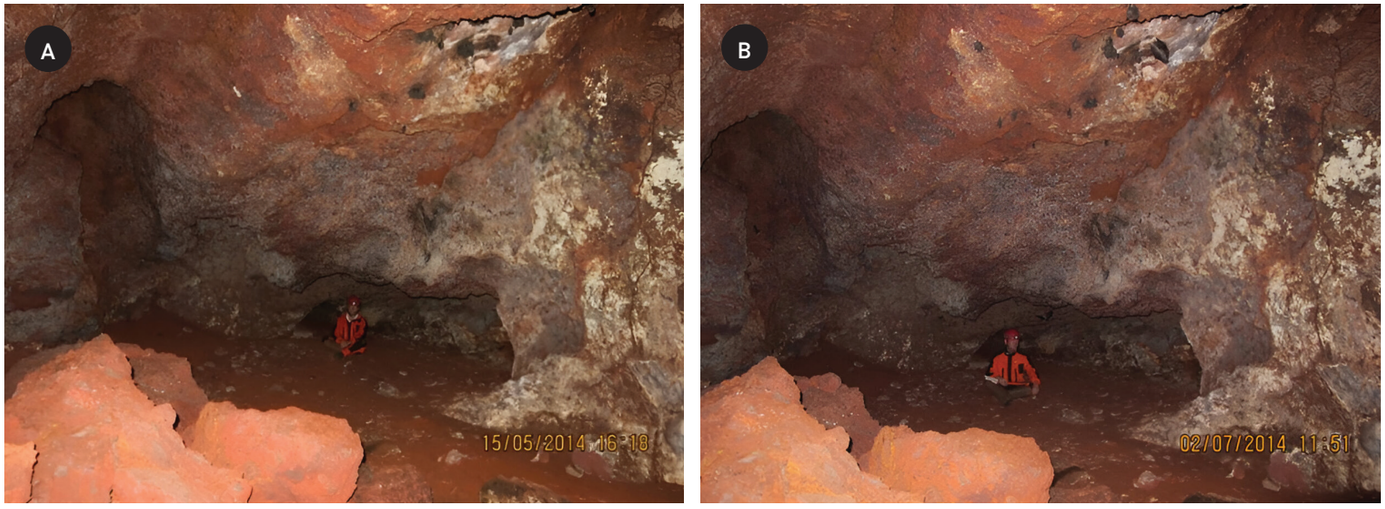


Figura 14: Monitoramento fotográfico em dois períodos distintos do 'Ponto 4' na cavidade natural subterrânea N4E_0026 mostrando a zona extensa de descontinuidade N-S: a) 15/05/2014 e b) 02/07/2014.
Figure 14: Photographic monitoring in two distinct periods of 'Point 4' in cave N4E_0026 showing the extensive N-S discontinuity zone: a) 15 May 2014 and b) 07/02/2014.

até 22/04/2015, apesar do incremento das cargas de explosivos (cargas máximas por espera – CME) até 990 quilos, as deformações estruturais continuavam mantendo valores referentes apenas às oscilações da abertura da fratura (da ordem de 0,03 milímetro de movimento), que corresponde à faixa de sensibilidade do instrumento, não sendo afetada pelas ondas de choque.

Com o prosseguimento da lavra, as cargas foram aumentadas de forma a provocar danos irreversíveis na cavidade natural subterrânea N4E_0026. Os dados obtidos pelo monitoramento foram coletados de forma contínua e interpretados com o objetivo de encontrar correlações entre as deformações diagnosticadas e as campanhas de detonação. Nesta fase, a câmera *online* foi de grande utilidade, mostrando em tempo real as condições de estabilidade no interior da cavidade, permitindo visualizar em tempo real as áreas previamente interpretadas como de alta instabilidade geotécnica.

Dos cinco locais com danos físicos observados no interior da cavidade, três foram causados pelo mecanismo de queda de bloco e dois foram controlados pela reativação de estruturas. Apesar do ICG mapear zonas de maior fragilidade, as entradas da cavidade foram as primeiras a serem impactadas pelos desmontes (entradas 1, 3 e 4) a partir do mecanismo de queda de bloco, produzindo blocos retangulares com até 3 metros de comprimento, resultante da interseção de planos de fraturas com bandas sub-horizontais. Embora as características geotécnicas

until 22 April 2015, despite the increase in explosive charges (maximum loads per hold – MLH) up to 990 kilos, the structural deformations continued to maintain values referring only to the oscillations of the fracture opening (on the order of 0.03 millimeters of movement), which corresponds to the sensitivity range of the instrument, not being affected by the shock waves.

As mining continued, the loads were increased to cause irreversible damage to cave N4E_0026. The data obtained through monitoring were collected continuously and interpreted with the aim of finding correlations between the diagnosed deformations and the blasting campaigns. At this stage, the *online* camera was very useful, showing in real time the stability conditions inside the cave with real-time visualization of the areas previously interpreted as having high geotechnical instability.

Of the five locations with physical damage observed inside the cave, three were caused by the block fall mechanism and two were controlled by the reactivation of structures. Although the CGI maps areas of greater fragility, the cavity entrances were the first to be impacted by the blasting (entrances 1, 3 and 4) by the block fall mechanism, producing rectangular blocks up to 3 meters long, resulting from the intersection of fracture planes with sub-horizontal bands. Although the geotechnical characteristics of all entrances were classified as

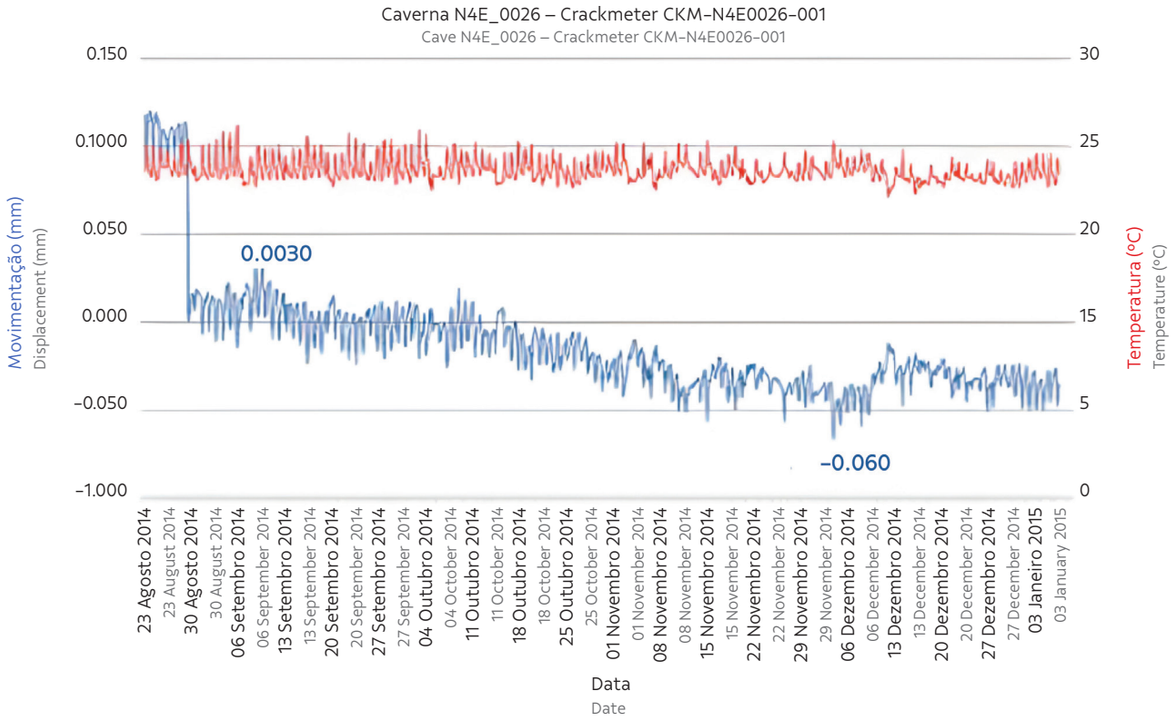


Figura 15 – Gráfico de deformação obtido pelo medidor da fratura (*crackmeter*) monitorada no teto da entrada 3 da cavidade natural subterrânea N4E_0026. Linha em azul: movimentação da estrutura em milímetro; e linha vermelha: variação da temperatura (C°).
Figure 15: Deformation graph obtained by the *crackmeter* monitoring the ceiling of Entrance 3 of cave N4E_0026. Blue line: movement of the structure in millimeters; red line: temperature variation (C°).

de todas as entradas tivessem sido classificadas como de qualidade boa ou razoável, essas regiões foram as que sofreram maiores impactos sob influência da proximidade das zonas de detonação da mina. Esse resultado sugere que existe uma maior susceptibilidade de deformações nas aberturas das cavernas do que em outras áreas, possivelmente pelo fato de as aberturas consistirem em zonas de concentração de tensões horizontais e verticais, e de contatos geológicos favoráveis a deformações.

Em relação aos mecanismos controlados por reativação de estrutura (Figura 17), foram observados em dois locais: o primeiro, localizado exatamente acima da Entrada 2 (Figura 18), foi responsável pelo impacto irreversível com consequente obstrução de sua entrada principal. Ele ocorreu por meio do plano de uma fratura fechada extensa, orientada segundo a direção NNW-SSE, que interceptava outra fratura extensa (direção NE-SW), definindo um grande bloco de dimensões métricas de aproximadamente 12 x 20 e 5 metros de espessura, com ambas as fraturas condicionando o desenvolvimento de conduítes

of good or reasonable quality, these regions were the ones that suffered the greatest impacts due to the proximity of the mine blasting zones. This result suggests that there was a greater susceptibility to deformations in the cave openings than in other areas, possibly because the openings consisted of zones of concentration of horizontal and vertical stresses, and geological contacts favorable to deformations.

Mechanisms controlled by structure reactivation (Figure 17) were observed in two locations. The first, located just above Entrance 2 (Figure 18), was responsible for the irreversible impact with consequent obstruction of its main entrance. This occurred through the plane of an extensive closed fracture, oriented in the NNW-SSE direction, which intercepted another extensive fracture (NE-SW direction), defining a large block of metric dimensions of approximately 12 x 20 and 5 meters thick, with both fractures conditioning the development of conduits and corridors. The second location with a structure controlling

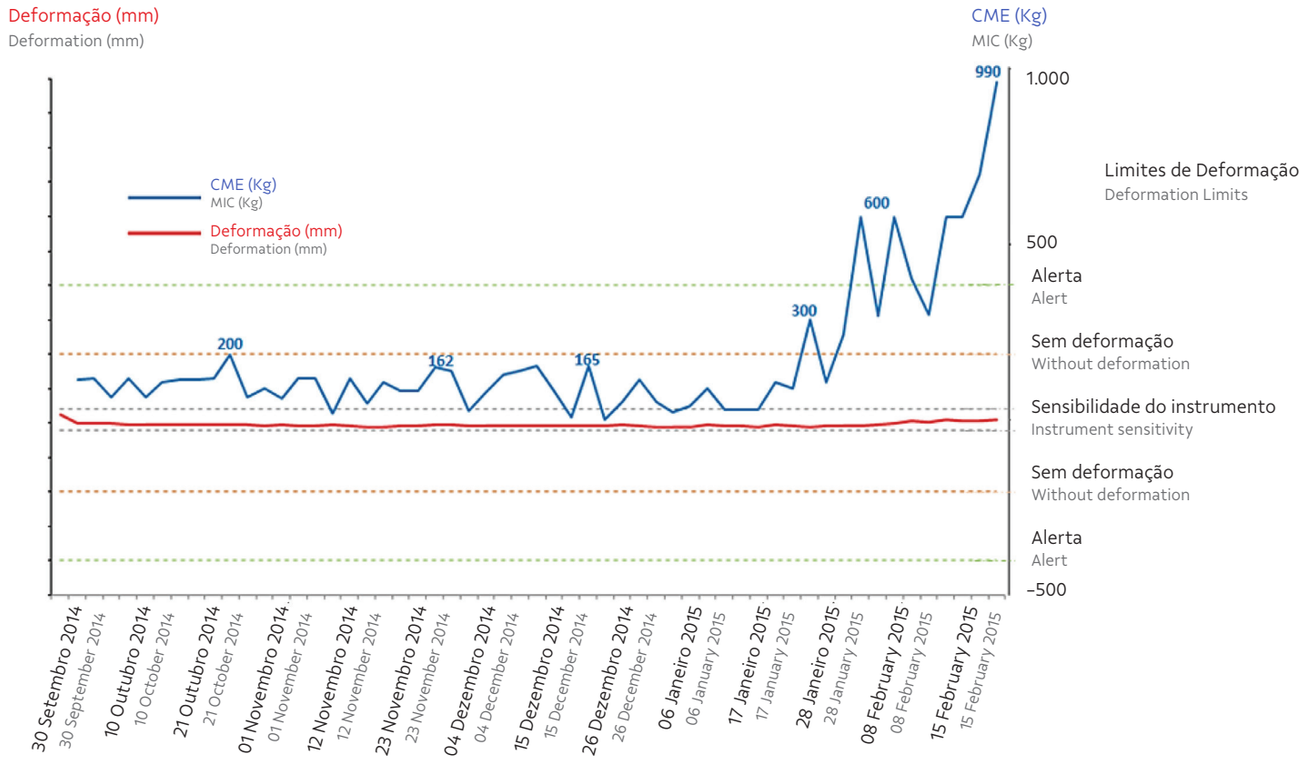


Figura 16: Gráfico de cargas de explosivos máximas por espera (CME) e deformações da fratura de teto da entrada 3 da cavidade natural subterrânea N4E_0026. As medidas evidenciam estabilidade mesmo nas datas dos desmontes onde não há deformação.
Figure 16: Graph of maximum instantaneous charge (MIC) and deformations of the ceiling fracture of Entrance 3 of cave N4E_0026. The measurements show stability even on the dates of blasting when there was no deformation.

e corredores. O segundo local com estrutura de controle de mecanismo por reativação estava localizado no setor leste da caverna, perto da Entrada 4. Este produziu um deslocamento de abertura de aproximadamente 30 centímetros na fratura NNW-SSE, preexistente no terreno no limite do planalto, em rocha hospedeira de crosta laterítica detrítica.

4.2 Quadrilátero ferrífero – estudo de caso: caverna MDIR_0028

Situada no contexto da Cava da Divisa, Mina de Brucutu da Vale S.A., na região sudeste do estado do Minas Gerais (Figura 19), a cavidade natural subterrânea MDIR_0028 foi classificada como de relevância máxima. O processo de licenciamento ambiental seguiu conforme orientações do CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavidades) e Instrução

the mechanism by reactivation was in the eastern sector of the cave, near Entrance 4. This produced an opening displacement of approximately 30 centimeters in the NNW-SSE fracture, preexisting in the terrain at the edge of the plateau, in host rock of detrital lateritic crust.

4.2 Quadrilátero ferrífero – case study of cave MDIR_0028

Located in the context of Cava da Divisa, Brucutu Mine of Vale S.A., in the southeast region of the state of Minas Gerais (Figure 19), cave MDIR_0028 was classified as of maximum relevance. The environmental licensing process followed the guidelines of Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavidades (CECAV) and Instrução de Serviço Sisema of the Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) MG no.

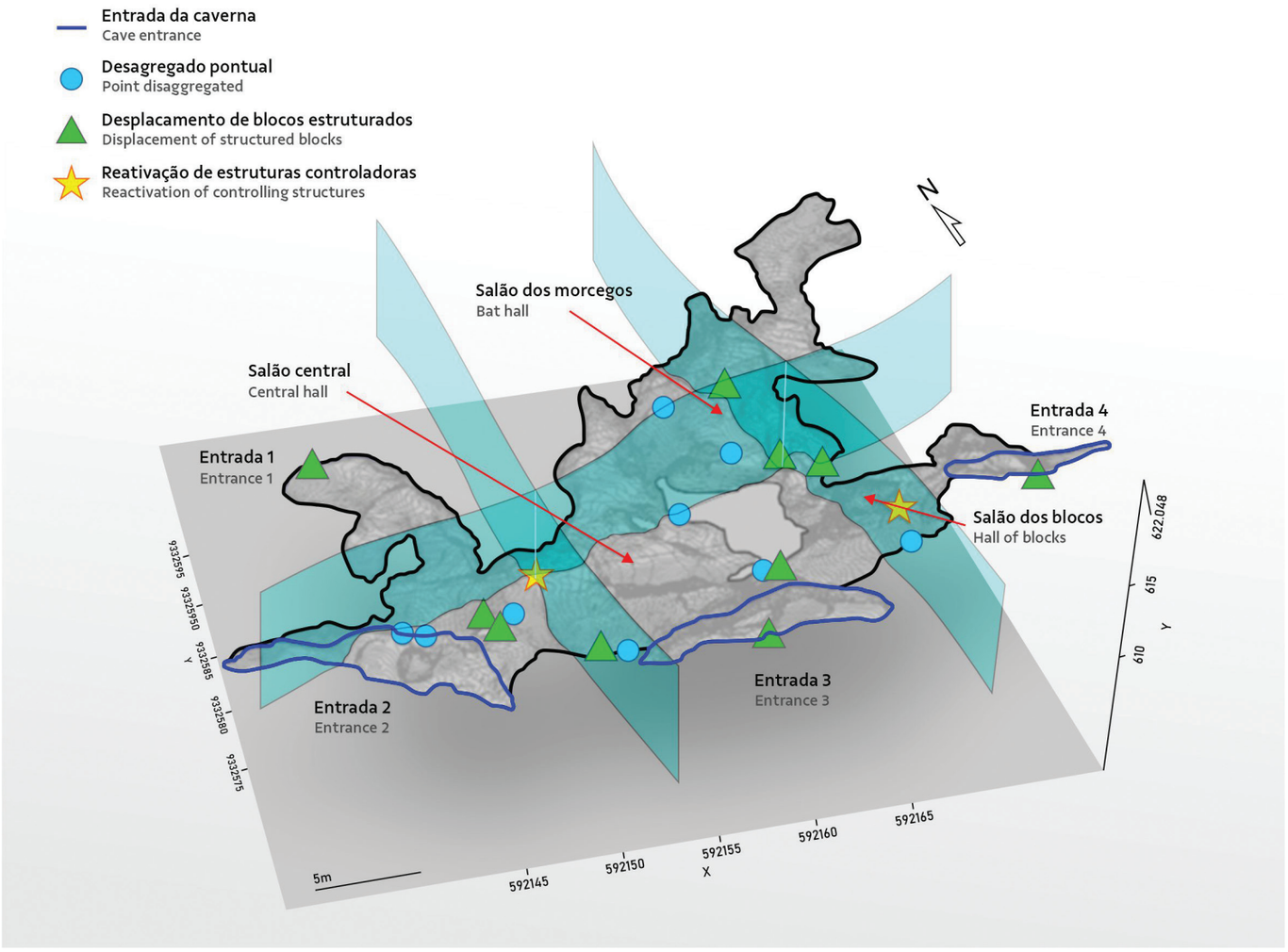


Figura 17: Mapa 3D da cavidade natural subterrânea N4E_0026 mostrando planos de fraturas e alterações observadas durante o experimento.
Figure 17: 3D map of cave N4E_0026 showing fracture planes and changes observed during the experiment.

de Serviço Sisema da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD MG nº 08/2017 (Rev.1), em que foi definida a área de influência espeleológica da cavidade, a qual se estabeleceu como limite para os avanços da operação minerária. Sendo que, para a porção jusante da cavidade, as intervenções poderiam chegar até 50 metros da entrada, seguindo as mesmas premissas do avanço gradativo da frente de lavra, conforme determinado pelo Plano Básico Ambiental do empreendimento (Figura 20).

08/2017 (Rev. 1), by which the area of speleological influence of the cave was defined, which was established as the limit for the advances of the mining operation. For the downstream portion of the cave, interventions could reach up to 50 meters from the entrance, following the same premises of the gradual advance of the mining front, as determined by the Plano Básico Ambiental of the project (Figure 20).



Figura 18: Cicatriz na parede da cavidade natural subterrânea N4E_0026 evidenciando desabamento ocorrido na Entrada 2.
Figure 18: Scar on the wall of cave N4E_0026 showing evidence of a collapse that occurred at Entrance 2.

4.2.1 Diagnóstico Geoestrutural

O conjunto de dados apresentados e discutidos nesse estudo de caso inclui a instrumentação sismográfica remota, dados de temperatura e umidade e mapeamentos geomecânicos.

4.2.1.1 Mapeamento Topográfico

O mapeamento topográfico da cavidade natural subterrânea MDIR_0028 foi realizado de acordo com o sistema de classificação *British Cave Research Association* – BCRA, com grau de precisão 5D. Nesse mapeamento são plotados os itens da planta baixa como contorno de paredes, blocos, linha d'agua, representações da área externa, projeção horizontal (método da descontinuidade) e o cálculo área e volume total da cavidade, além de dados litoestruturais (Figura 21).

4.2.1.2 Mapeamento Geológico

A mina de Brucutu, onde se encontra a cavidade MDIR_0028, está localizada na região leste do Quadrilátero Ferrífero (QF), na porção nordeste do Sinclinal Gandarela. Encontra-se no contexto geológico do supergrupo Minas, onde ocorrem rochas pertencentes ao Grupo Itabira, constituído por filitos e itabiritos dolomíticos da Formação Gandarela; e itabiritos (compactos e friáveis) e hematitas compactas da Formação Cauê. As Figura 22 e Figura 23 demostram as condições geológicas da região da mina de Brucutu em mapa geológico e perfil esquemático local.

A cavidade se desenvolve no itabirito e na canga detrítica com diferentes estágios de formação, preservando estruturas

4.2.1 Geostructural Diagnosis

The dataset presented and discussed in this case study includes remote seismographic instrumentation, temperature and humidity data, and geomechanical mappings.

4.2.1.1 Topographic Mapping

The topographic mapping of cave MDIR_0028 was carried out according to the *British Cave Research Association* (BCRA) classification system, with a 5D degree of accuracy. This mapping plots the items of the floor plan, such as the outline of walls, blocks, waterline, representations of the external area, and horizontal projection (discontinuity method), and calculates the total area and volume of the cave, in addition to mapping lithostructural data (Figure 21).

4.2.1.2.Geological Mapping

The Brucutu Mine, where cave MDIR_0028 is located, is in the eastern region of the Quadrilátero Ferrífero (QF), in the northeastern portion of the Gandarela Syncline. It is located in the geological context of the Minas Supergroup, where rocks belonging to the Itabira Group occur, consisting of dolomitic phyllites and itabirites of the Gandarela Formation; and itabirites (compact and friable) and compact hematites of the Cauê Formation. Figures 22 and 23 demonstrate the geological conditions of the Brucutu Mine region on a geological map and a local schematic profile, respectively.

The cave develops in the itabirite and detrital canga with different stages of formation, preserving relict structures, such as

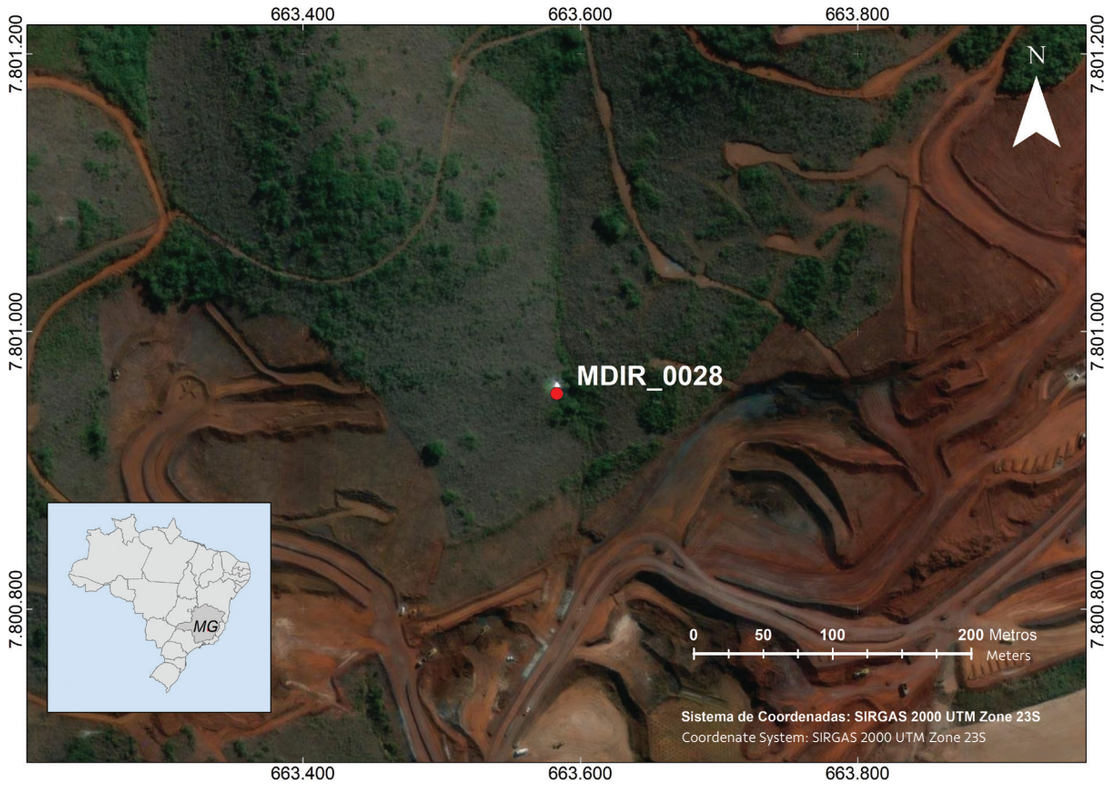


Figura 19: Localização da cavidade natural subterrânea MDIR_0028 no entorno da Cava da Divisa – Mina de Brucutu.
Figure 19: Location of cave MDIR_0028 in the surroundings of Cava da Divisa, Brucutu Mine.

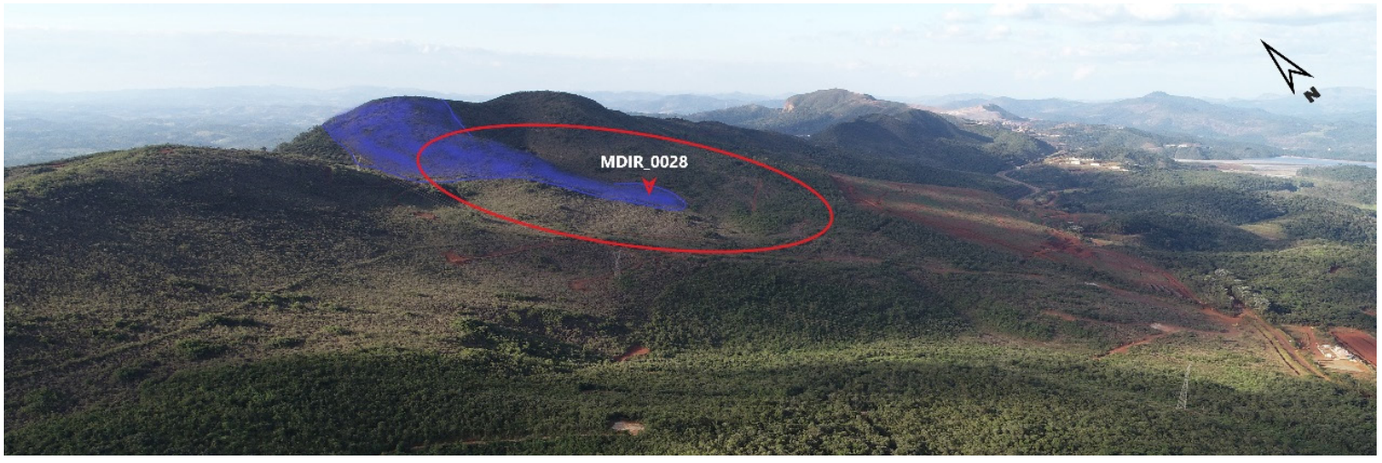


Figura 20: Localização da cavidade natural subterrânea MDIR_0028 e sua área de influência em foto aérea antes da implantação da Cava da Divisa. O círculo em vermelho mostra o limite aproximado dos 250 metros da cavidade, e a área destacada em azul indica a sua área de influência.
Figure 20: Aerial photo of the location of cave MDIR_0028 and its area of influence before the implementation of Cava da Divisa. The red circle shows the approximate 250-meter limit of the cave, while the area highlighted in blue indicates its area of influence.

reliquiares, como a transformação do itabirito para canga detrítica. Também são frequentes estruturas deformacionais como dobras, fraturas e planos de bandamento. Na Figura 24 é apresentado o mapa geoestrutural da cavidade MDIR_0028, com indicação de litotipos, contatos e estruturas mapeadas.

4.2.1.3 Diagnóstico Geotécnico e Classificação Geomecânica

A cavidade natural subterrânea MDIR_0028 é marcada pelo contato erosivo entre a canga e o itabirito, que é observado desde a entrada e ao longo do desenvolvimento dos condutos. O teto é formado por canga e por itabirito, com ocorrência de diversas descontinuidades e dobras, sendo que nas paredes predomina o itabirito. A cavidade encontra-se em baixas profundidades no terreno, com espessura de teto média inferior a 5 metros de altura. A Figura 25 mostra o mapa geomecânico da cavidade MDIR_0028 utilizando o índice geomecânico de Bienawski (1974).

4.2.1.4 Diagnóstico IGC

O mapeamento do Índice Geotécnico de Cavidades (IGC) para a cavidade natural subterrânea MDIR_0028 permitiu a definição do grau de susceptibilidade à instabilidade estrutural de cada vão, tendo sido possível mensurar a fragilidade dessa caverna frente ao avanço de lavra controlada. Na cavidade MDIR_0028 foram mapeados dois vãos com vulnerabilidade alta e um vão com vulnerabilidade muito alta, conforme demonstra o mapa de risco geotécnico (Figura 26).

4.2.2 Monitoramento

O monitoramento na cavidade natural subterrânea MDIR_0028 teve-início após a obtenção da licença ambiental, em março de 2019. As visitas à cavidade ocorrem mensalmente, com monitoramento geoestrutural semestral e monitoramento sismográfico contínuo. São realizadas medições de parâmetros físicos e acompanhamento da capacidade de resistência da caverna, a partir do avanço das atividades minerárias até a área de influência, alcançado em dezembro de 2023. O monitoramento continua durante as operações do empreendimento.

O registro dos dados da integridade da cavidade MDIR_0028 é feito de forma manual (Figura 27), com instalação de pontos para medição de espaçamento de condutos e descontinuidades no seu interior. Entre os parâmetros físicos, a vibração é medida a partir do sismógrafo *Vibracord*, com transmissão via *web* através de estações de telemetria, que enviam dados de forma contínua e em tempo real para o servidor de banco de dados da Sequência Engenharia. Os dados são tratados em *software* específico

the transformation of the itabirite to detrital canga. Deformational structures such as folds, fractures and banding planes are also frequent. Figure 24 shows the geostructural map of cave MDIR_0028, indicating lithotypes, contacts and mapped structures.

4.2.1.3 Geotechnical Diagnosis and Geomechanical Classification

Cave MDIR_0028 is marked by the erosive contact between the canga and the itabirite, which is observed from the entrance and throughout the development of the conduits. The ceiling is formed by canga and itabirite, with several discontinuities and folds, with itabirite predominating in the walls. The cave is located at shallow depths in the terrain, with an average ceiling thickness of less than 5 meters. Figure 25 shows the geomechanical map of cave MDIR_0028 using the Bienawski Geomechanical Index (1974).

4.2.1.4 CGI Diagnosis

The CGI mapping of cave MDIR_0028 allowed the degree of susceptibility to structural instability to be defined for each span, making it possible to measure the fragility of this cave in the face of controlled mining advance. Two spans with high vulnerability and one span with very high vulnerability were mapped in cave MDIR_0028, as shown in the geotechnical risk map (Figure 26).

4.2.2 Monitoring

Monitoring in cave MDIR_0028 began after obtaining the environmental license in March 2019. Visits to the cave occurred monthly, with biannual geostructural monitoring and continuous seismographic monitoring. Measurements of physical parameters and monitoring of the cave's resistance capacity were carried out, from the advancement of mining activities to the area of influence, reached in December 2023. Monitoring continues during the operations of the project.

Integrity data for cave MDIR_0028 were recorded manually (Figure 27), with the installation of points to measure conduit spacing and discontinuities within it. Among the physical parameters, vibration is measured using a *Vibracord* seismograph, with *web* transmission through telemetry stations, which send data continuously and in real time to the Sequência Engenharia database server. The data is processed using specific *software* (*Vibration Meter*). In cases of any vibration that differs from the previously defined base values, the platform

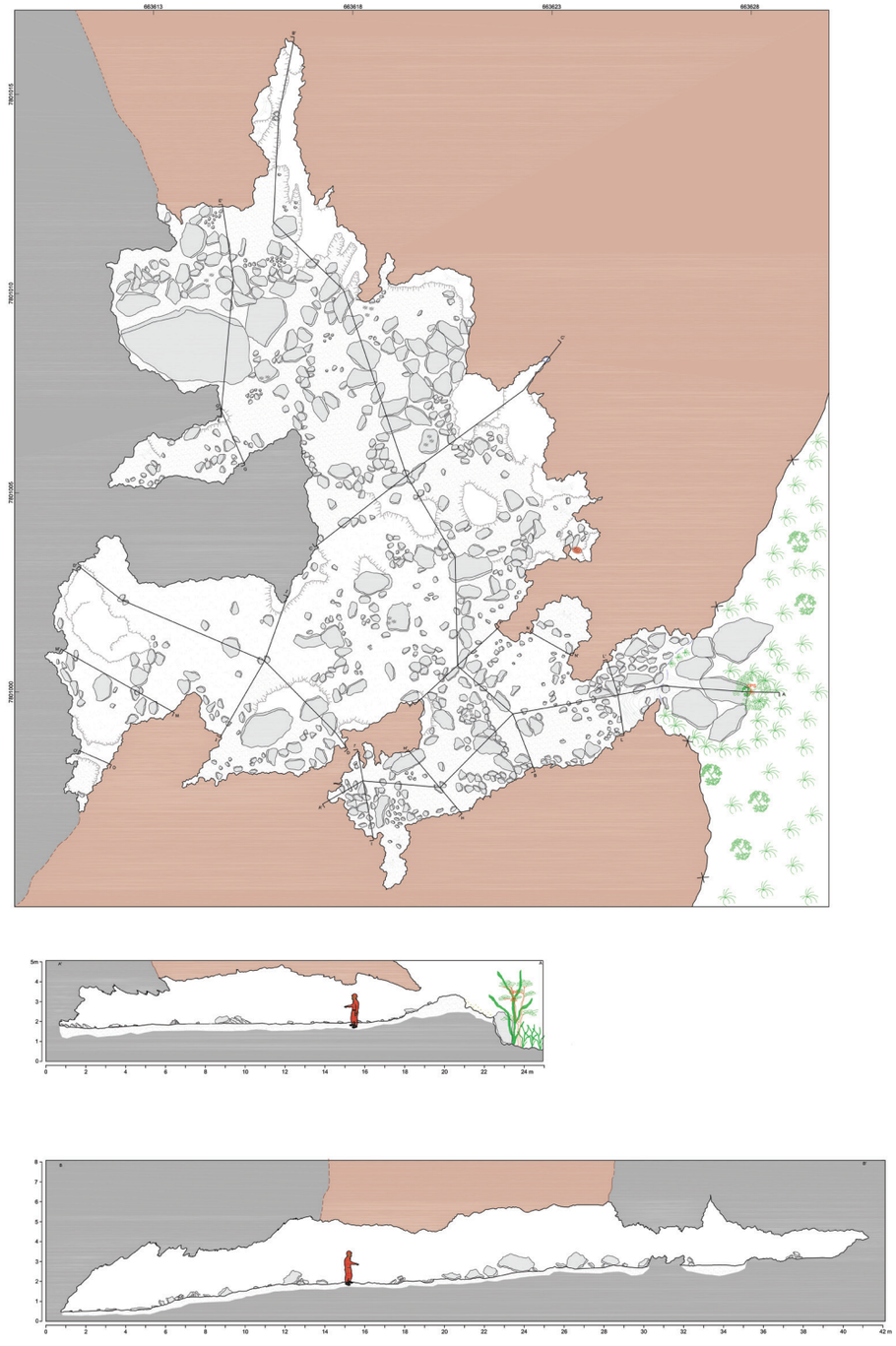
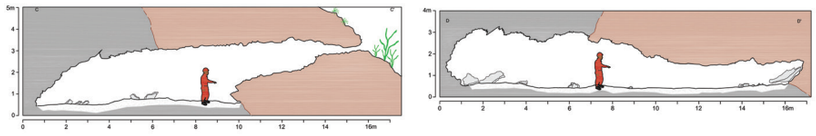
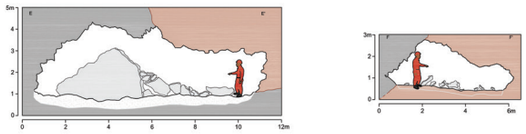
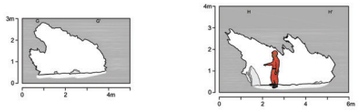


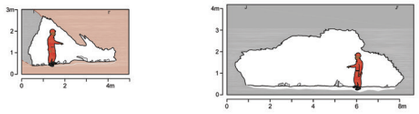
Figura 21: Mapa topográfico da cavidade natural subterrânea MDIR_0028. Elaborado pela empresa Ativo Ambiental em escala 1:100.
Figure 21: Topographic map of cave MDIR_0028. Elaborated by Ativo Ambiental on a scale of 1:100.

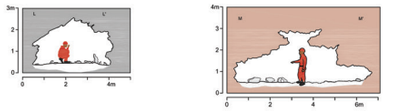


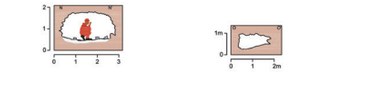
UTM: 663628E / 7801000N / 928m
Datum: SAD 69 – Zona/Zone: 23S
Classificação/Classification BCRA: 5D
Projeção Horizontal/Horizontal length: 100.70m
Área/Area: 536.36m²
Volume aproximado/Approximate volume: 868.90m³
Desnível/Slope: 4m

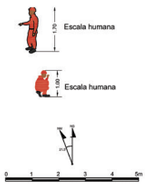












Itabirito Itabirite

Canga Canga

GPS entrada Entrance GPS

Indicação do sentido da seção Indication of direction of section

Blocos e matacões Blocks and boulders

Vegetação Vegetation

Parede interna Internal wall

Parede externa External wall

Linha d'água Waterline

Contato geológico inferido Inferred geological contact

Banco de sedimentos Sediment bank

Desnível abrupto Abrupt slope

Patamar/ Desnível suave Level/ Smooth slope

Curva de nível Level curve

Guano Guano

Cupinzeiro Termite mound

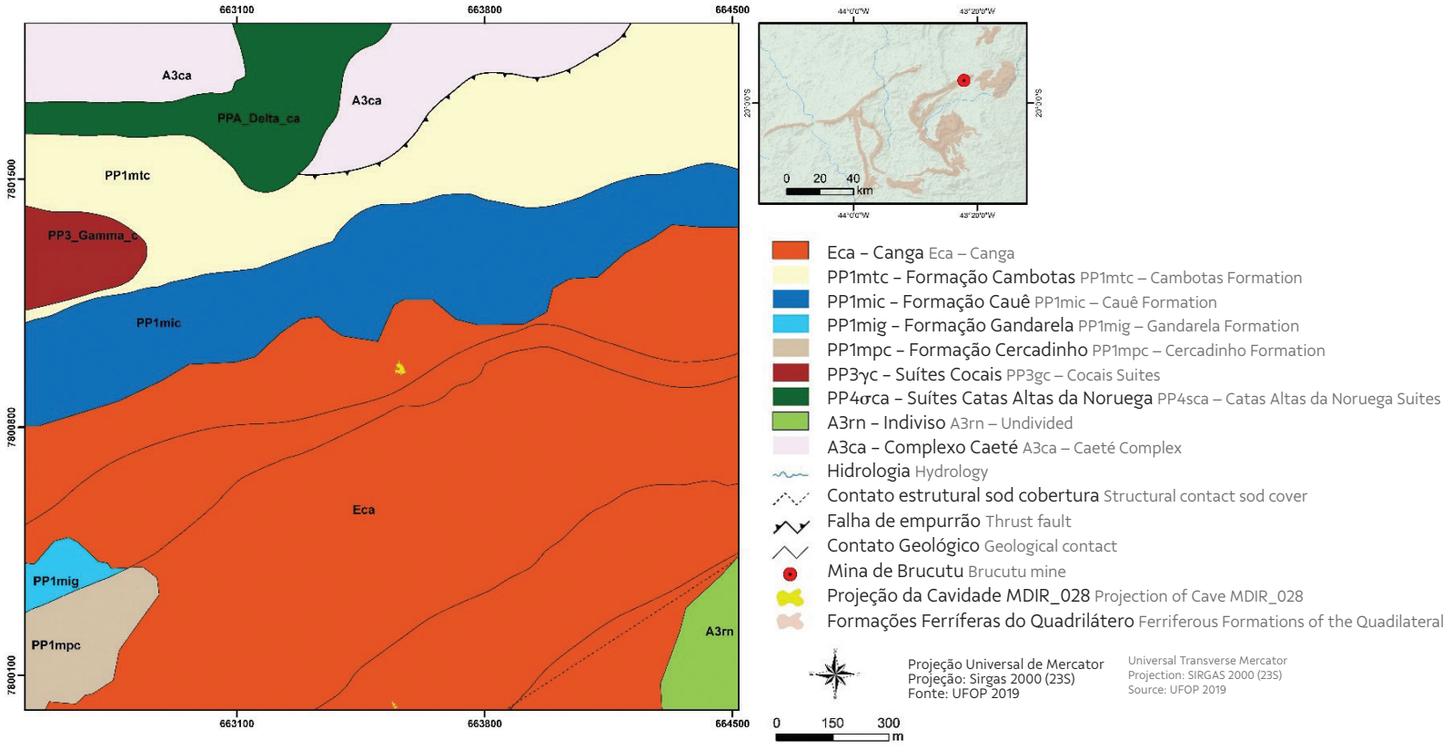


Figura 22: Mapa geológico da região onde se localiza a cavidade natural subterrânea MDIR_0028.
Figure 22: Geological map of the region where the cave MDIR_0028 is located.

(*Vibration Meter*). Em casos de alguma vibração discrepante dos valores base previamente definidos, a plataforma emite alertas para os *e-mails* cadastrados. Além disso, também foram realizadas medições de espaçamento de fraturas, onde é feita uma avaliação do deslocamento *in situ* com o auxílio de um paquímetro (aberturas pequenas) e trena a *laser* (em caso de espaçamentos maiores). Para garantir a realização das mesmas medidas ao longo do monitoramento, são fixadas placas de alumínio, tendo como referência as bases e visadas dos pontos de aferição de deslocamento. As medições dos demais parâmetros físicos, como umidade relativa do ar e temperatura do ambiente, foram executadas utilizando *data loggers* de temperatura e umidade. Além dos sensores remotos, também foram realizados monitoramentos fotográficos e inspeções visuais-à medida que a lavra avançava em direção à área de influência da cavidade.

4.2.3 Análise dos Resultados e Conclusões do Estudo

Os valores de recalque piso-teto medidos nos pontos de monitoramento geoestrutural estabelecidos na cavidade natural

sends alerts to registered *e-mails*. In addition, fracture spacing measurements were also performed, whereby an assessment of *in situ* displacement is made using a caliper (small openings) and a *laser* tape measure (larger spacings). To ensure that the same measurements are taken throughout the monitoring, aluminum plates are fixed, using the bases and sights of the displacement measurement points as reference. Measurements of other physical parameters, such as air relative humidity and ambient temperature, were performed using temperature and humidity *data loggers*. In addition to remote sensors, photographic monitoring and visual inspections were also carried out as mining progressed towards the area of influence of the cave.

4.2.3 Analysis of the Results and Conclusions of the Study

The floor-to-ceiling settlement values measured at the geostructural monitoring points established in cave MDIR_0028

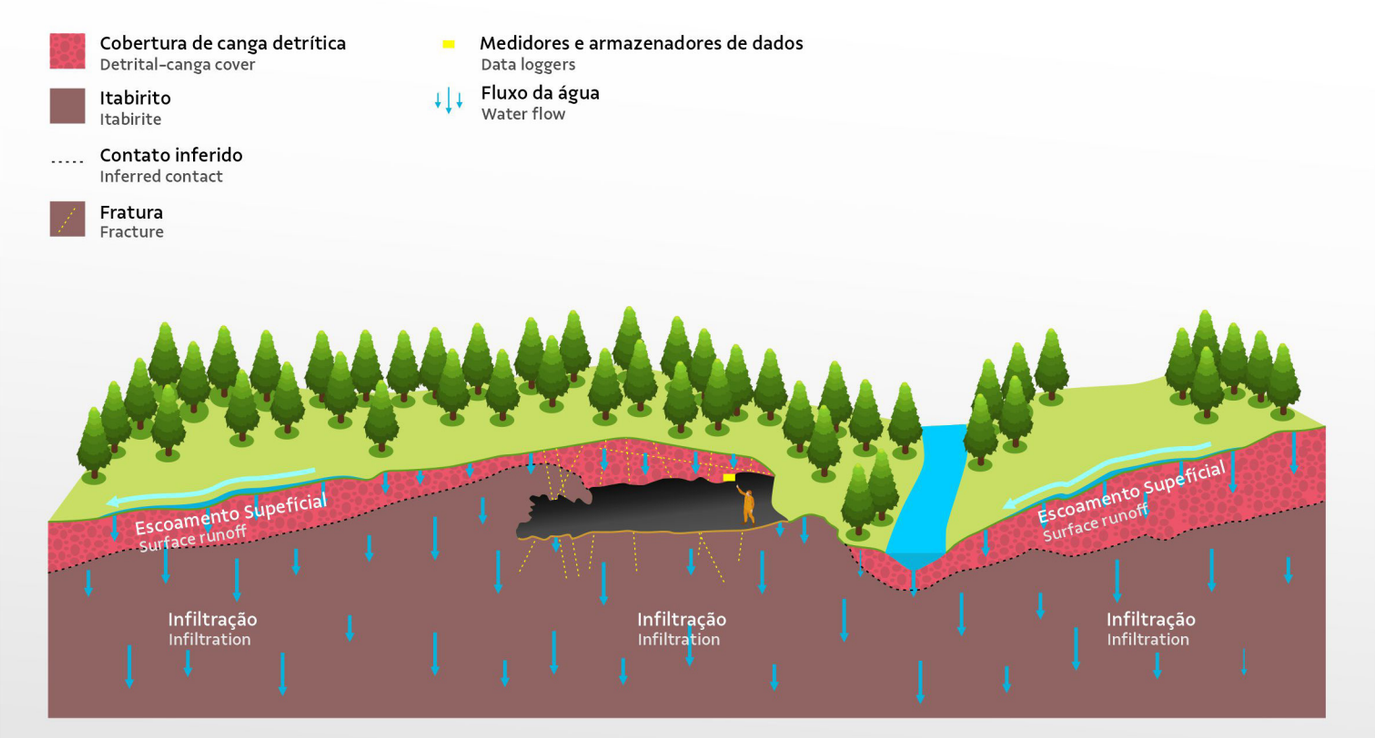


Figura 23: Seção esquemática com indicação de forma aproximada da geologia no local de inserção da cavidade natural subterrânea MDIR_0028.
Figure 23: Schematic section indicating the approximate shape of the geology at the insertion site of cave MDIR_0028.

subterrânea MDIR_0028 indicaram variações milimétricas apenas em um dos pontos de monitoramento (ponto M2 – entrada da caverna), onde o monitoramento do bloco existente no teto da entrada da cavidade mostrou que os valores de deslocamento tiveram uma variação máxima em torno de seis milímetros (Figura 28 e 29). Isto indica uma fragilidade existente neste setor da cavidade. Nesse caso, os valores obtidos em momento anterior às atividades de operação do empreendimento indicam uma zona de fragilidade da caverna e servem como controle para indicar possíveis alterações futuras na integridade física da caverna.

De forma geral, verifica-se que, em rochas ferríferas, a zona de contato entre as principais fraturas e o limite geomecânico entre duas qualidades de rocha distintas indicam fragilidades estruturais. No entanto, com a metodologia de mapeamento do IGC na cavidade natural subterrânea MDIR_0028, foi possível classificar setores de susceptibilidade muito alta, que resultaram nas suas respectivas interdições após um período de chuvas intensas e volumosas em toda a região que poderia

indicated millimetric variations only at one of the monitoring points (Point M2 – cave entrance), where monitoring of the existing block on the ceiling of the cave entrance showed that the displacement values had a maximum variation of around six millimeters (figures 28 and 29). This indicates a fragility existing in this sector of the cave. In this case, the values obtained at a time prior to the project's operating activities indicated a zone of fragility in the cave and served as a control to indicate possible future changes in the cave's physical integrity.

In general, in iron-bearing rocks, the contact zone between the main fractures and the geomechanical limit between two distinct rock qualities indicate structural weaknesses. However, the CGI mapping methodology in cave MDIR_0028 made it possible to classify sectors of very high susceptibility, which resulted in their respective closures after a period of intense and voluminous rains throughout the region that could have

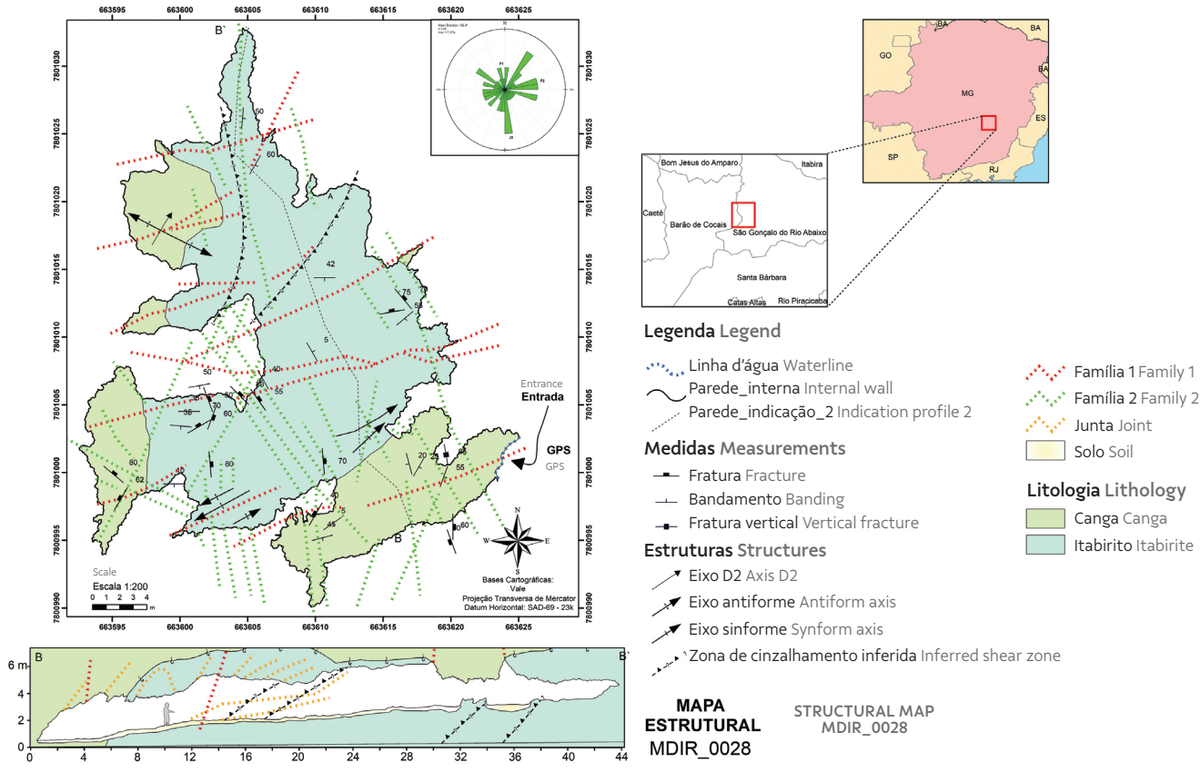


Figura 24: Mapa Geoestrutural da cavidade natural subterrânea MDIR_0028.
Figure 24: Geostructural map of cave MDIR_0028.

comprometer a estabilidade da cavidade. O mapeamento dos demais setores de susceptibilidade alta a média também é importante, principalmente para definir um roteiro seguro de acesso das equipes durante os monitoramentos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A rotina dos trabalhos de monitoramentos ambientais tem proporcionado o levantamento sistemático de dados geoestruturais, geomecânicos, ambientais (umidade e temperatura), sismológicos, fotográficos, hidrogeológicos e biológicos, que constituem um robusto banco de dados que dão suporte a importantes trabalhos de interpretação sobre a dinâmica de funcionamento dos ambientes subterrâneos e suas interações com o entorno. Esses dados, trabalhados de forma integrada aos elementos da paisagem, tem propiciado o desenvolvimento de modelos inovadores que nos permitem melhores entendimentos sobre os tipos de deformações geoestruturais específicos e mais

compromised the stability of the cave. Mapping the other sectors of high to medium susceptibility is also important, mainly to define a safe access route for teams during monitoring.

5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The routine of environmental monitoring work has provided a systematic collection of geostructural, geomechanical, environmental (humidity and temperature), seismological, photographic, hydrogeological and biological data, which constitute a robust database that supports important interpretation work on the dynamics of underground environments and their interactions with the surroundings. These data, processed in an integrated manner with the elements of the landscape, have enabled the development of innovative models that allow us to better understand the types of specific

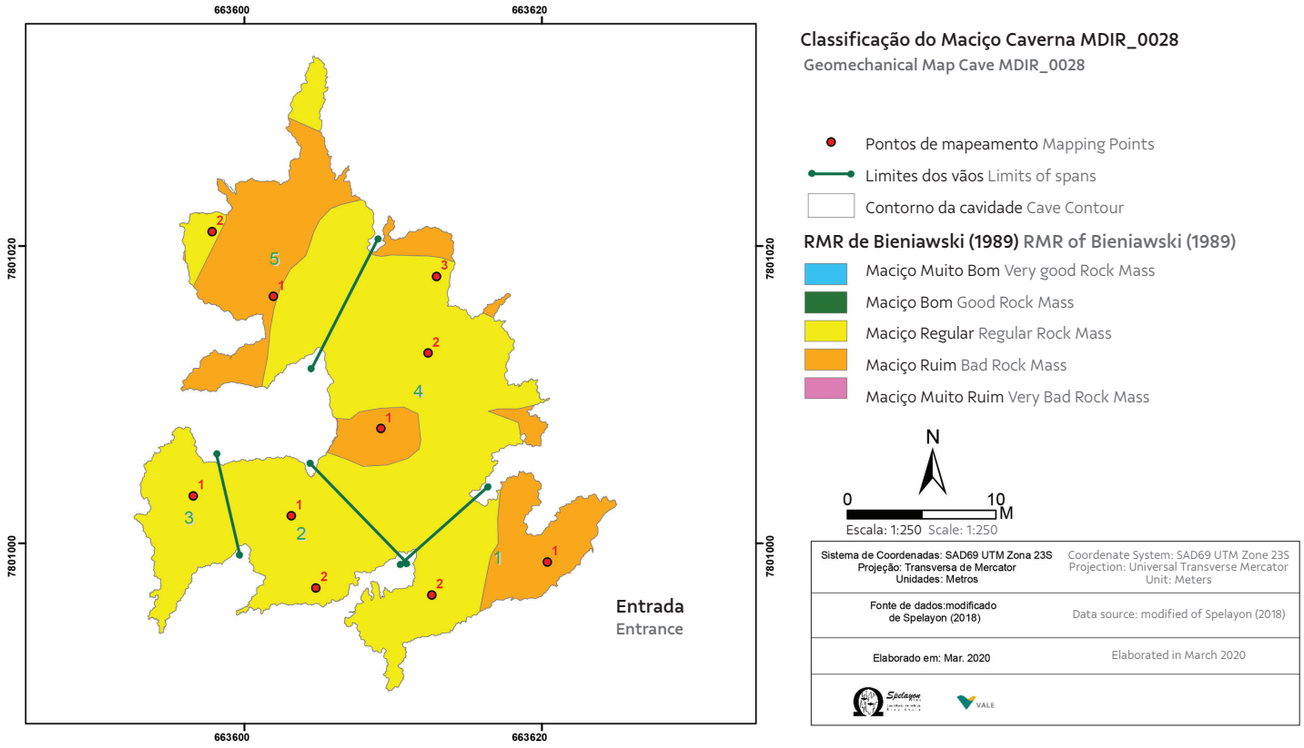


Figura 25: Classificação geomecânica da cavidade natural subterrânea MDIR_0028 utilizando o índice geomecânico de Bienawski (1974).
Figure 25: Geomechanical classification of cave MDIR_0028 using the Bienawski Geomechanical Index (1974).

comuns nas cavernas em litologias ferríferas. O entendimento das deformações geoestruturais é melhor interpretado a partir da análise integrada dos dados geotécnicos com os tamanhos dos vãos, volumes, tipos de preenchimentos das fraturas e falhas, períodos do ano em que são mais comuns e até mesmo influências do meio biótico.

No exercício da coleta de dados, uma série de equipamentos tem sido utilizada, favorecendo também o desenvolvimento de recursos tecnológicos aplicáveis à espeleologia. Como exemplo desses tipos de equipamentos, pode-se citar: martelos de Schmidt, *crackmeters* e *convergencemeters* (esses dois com transmissão remota de dados), inclinômetros, medidores de trincas (réguas e paquímetros), equipamentos que promovem levantamentos topográficos a *laser* e o georadar.

Com a aplicação de métodos de classificação geomecânica de maciços rochosos, devidamente adaptados para avaliação dos níveis de suscetibilidade a instabilidade geotécnica dos vãos e condutos das cavernas, grande atenção tem sido dada

and most common geostructural deformations in caves in ferriferous lithologies. The understanding of geostructural deformations is best interpreted from the integrated analysis of geotechnical data with the sizes of the gaps, volumes, types of filling of fractures and faults, times of the year in which they are most common and even influences of the biotic environment.

A series of equipment has been used in the exercise of data collection, which also favors the development of technological resources applicable to speleology. Examples of these types of equipment include: Schmidt hammers, *crackmeters* and *convergencemeters* (these two with remote data transmission), inclinometers, crack gauges (rulers and calipers), equipment that promotes *laser* topographic surveys and georadar.

With the application of geomechanical classification methods for rock masses, duly adapted to assess the levels of susceptibility to geotechnical instability of caves and conduits, great attention has been given to the issues of safety and

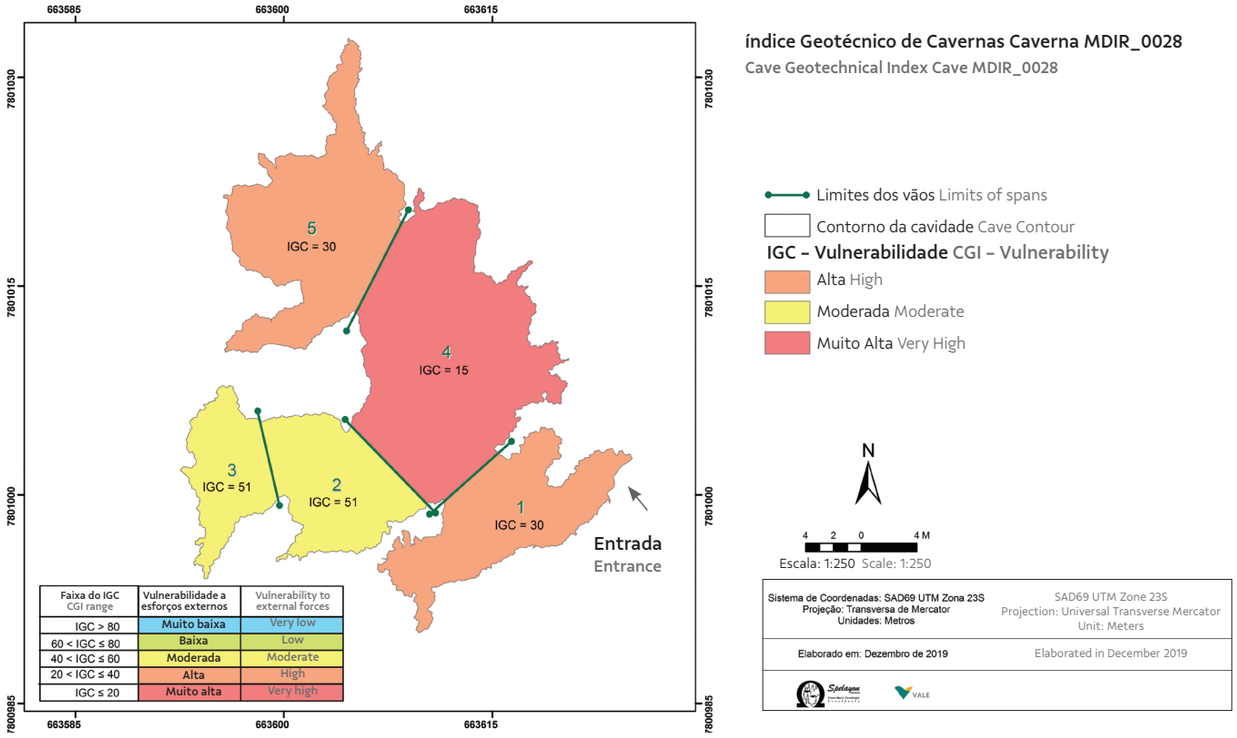


Figura 26: Mapa de IGC para a cavidade natural subterrânea MDIR_0028.
Figure 26: CGI map for cave MDIR_0028.

aos temas segurança e estabilidade geotécnica na espeleologia contemporânea. Nesse sentido, a prática da metodologia que emprega as variáveis do IGC (Índice Geotécnico de Cavernas), acumulando o mapeamento de mais de 500 vãos de cavernas ao entorno de minas em operação, promove um conhecimento importante sobre a forma como as cavernas absorvem os esforços antrópicos e naturais do seu entorno e respondem com alterações físicas no nosso tempo de acompanhamento e medições. A dinâmica hídrica, concliada à geometria das formas de teto, espessura do teto e qualidade do maciço (variáveis do IGC), tem se mostrado essencial para o entendimento das alterações registradas.

Em consonância com os trabalhos práticos, reconhecidas instituições acadêmicas também têm contribuído para o aprimoramento dos modelos clássicos de formação geomecânica da geotecnia, especializando-os para a ciência espeleológica. Recentes publicações têm demonstrado que, de maneira geral, as cavernas em litologias ferríferas são estruturas muito

geotechnical stability in contemporary speleology. In this sense, the practice of the methodology that employs the variables of the CGI (Caves Geotechnical Index), accumulating the mapping of more than 500 caves around operating mines, promotes important knowledge about how caves absorb the anthropic and natural stresses of their surroundings and respond with physical changes during the time of monitoring and measurement. Water dynamics, combined with the geometry of ceiling shapes, ceiling thickness and quality of the mass (CGI variables), has proven essential for understanding the recorded changes.

In line with practical work, renowned academic institutions have also contributed to the improvement of classical models of geomechanical formation in geotechnics, specializing them for speleological science. Recent publications have demonstrated that, in general, caves in ferriferous lithologies are very stable

estáveis, apresentando, quando submetidas a esforços de origem antrópica, alterações localizadas em pontos que podem ser previamente diagnosticados.

O trabalho integrado da espeleologia com as ciências ambientais, exercido por meio das práticas do monitoramento e tratamento dos dados coletados em campo, tem sido fortemente auxiliado com os recursos da inteligência artificial. Modelos matemáticos preditivos têm sido desenvolvidos e podem ser usados cada vez mais na mitigação de alterações nas estruturas das cavidades.

structures, presenting, when subjected to forces of anthropic origin, localized changes in points that can be previously diagnosed.

The integrated work of speleology with environmental sciences, carried out through monitoring and processing of data collected in the field, has been greatly aided by the resources of artificial intelligence. Predictive mathematical models have been developed and can be increasingly used to mitigate changes in the structures of caves.



Figura 27: Fotografias do interior e entorno da cavidade natural subterrânea MDIR_0028 mostrando a tecnologia implementada para o monitoramento da cavidade.
Figure 27: Photographs of the interior and surroundings of cave MDIR_0028 showing the technology implemented for monitoring.

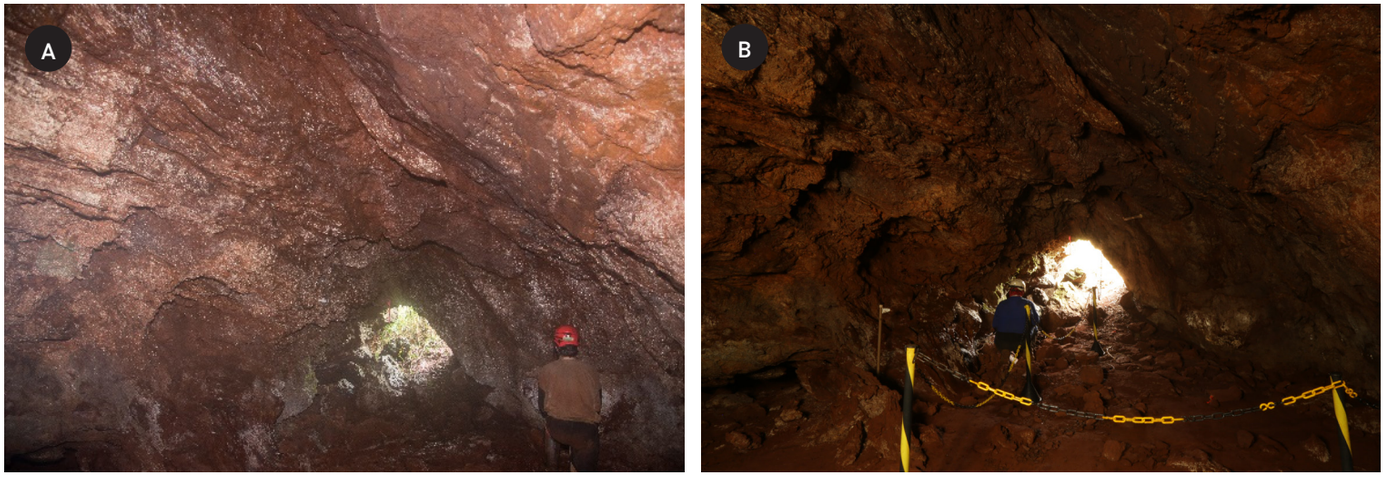


Figura 28: Fotografias de dois períodos distintos do Ponto M2 na cavidade natural subterrânea MDIR_0028 mostrando um ponto de atenção associado à zona de descontinuidade E-W: a) 21/11/2018 e b) 27/09/2023. A área está sinalizada com placas de aviso indicando sua fragilidade, para que as pessoas evitem entrar nela.
Figure 28 – Photographs of Point M2 in cave MDIR_0028 from two different periods, showing a point of attention associated with the E-W discontinuity zone: a) 21 November 2018 and b) 27 September 2023. The area is marked with warning signs indicating its fragility so that people avoid entering it.

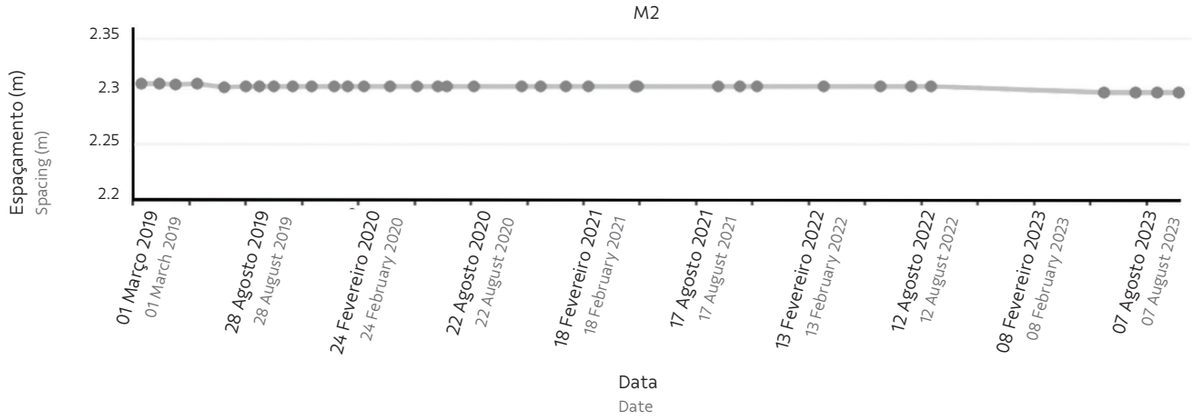


Figura 29: Gráfico de medidas manuais de espaçamento no Ponto M2 de uma fratura monitorada no teto do salão de entrada da cavidade natural subterrânea MDIR_0028. Foi verificada uma diminuição de seis milímetros no espaçamento medido neste ponto.
Figure 29 – Graph of manual spacing measurements at Point M2 of a monitored fracture in the ceiling of the entrance hall of cave MDIR_0028. A decrease of six millimeters in the measured spacing was verified at this point.

Diante do exposto neste capítulo e com base na experiência de mais de uma década de estudos geotécnicos e geomecânicos em cavernas ferríferas, a seguir são elencadas as principais recomendações para a realização do programa de monitoramento geoestrutural e geotécnico vinculado a processos de licenciamento ambiental:

In view of the above in this chapter, and based on the experience of more than a decade of geotechnical and geomechanical studies in ferriferous caves, the following are the main recommendations for carrying out a geostructural and geotechnical monitoring program linked to environmental licensing processes:

1. Fazer o mapeamento topográfico de detalhe da cavidade natural subterrânea. Sempre que possível é recomendado o mapeamento 3D com uso de escâner;
2. Realizar detalhadamente o diagnóstico geoestrutural da cavidade natural subterrânea;
3. Definir os pontos e locais de maior fragilidade para que sejam monitorados ao longo do tempo e do avanço do empreendimento;
4. Verificar, sempre que identificada alguma alteração, a correlação com o avanço do empreendimento através de análises estatísticas, principalmente em relação à distância do empreendimento e das fontes de vibração;
5. Registrar e documentar o monitoramento através de fotografias e planilhas que permitam a comparação ao longo do tempo;
6. Apresentar resultados de forma clara e objetiva, evitando suposições e inferências que não possam ser comprovadas.

1. Perform detailed topographic mapping of the cave. Whenever possible, 3D mapping using a scanner is recommended;
2. Perform a detailed geostructural diagnosis of the cave;
3. Define the points and locations of greatest fragility so that they can be monitored over time and as the project progresses;
4. Whenever any change is identified, verify any correlation with the progress of the project through statistical analyses, especially in relation to distance from the project and sources of vibration;
5. Record and document monitoring through photographs and spreadsheets that allow comparisons over time;
6. Present results in a clear and objective manner, avoiding assumptions and inferences that cannot be proven.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ARAÚJO, R. N. *et al*. Levantamento litoestrutural em cavidades em formação ferrífera utilizando dados de laser scanner 3D. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 7., 2016, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de parâmetros geomecânicos de uma cavidade natural subterrânea utilizando tecnologias de laser scanner 3D e realidade virtual**. 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BARBOSA, M. R. *et al*. Breakdown mechanisms in iron caves. An example from Brazil. **International Journal of Speleology**, v. 48, n. 2, p. 179–190, 2019.

BARTON, N. R.; LUNDE, J.; LIEN, R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v. 6, n. 4, p. 189–236, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Estimating the strength of rock materials. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 74, n. 8, p. 312–320, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. *In:* BIENIAWSKI, Z.T. (ed.). SYMPOSIUM EXPLORATION FOR ROCK ENGINEERING, 1976, Cape Town. **Proceedings** [...]. Cape Town: Balkema, 1976. p. 97–106.

BRADLEY, W. H.; FAHLEY, J. J. Occurrence of stevensite in the Green River Formation of Wyoming. **American Mineralogist**, v. 47, p. 996–998, 1962.

BRANDI, I.V. **Índice geotécnico de cavernas em terrenos ferríferos**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

BRANDI, I. V. *et al*. Physical stability of iron ore caves: geomechanical studies of a shallow underground cave in SE Brazil**. REM – International Engineering Journal**, v. 72, n. 2, p. 217–225, 2019.

BRANDI, I. V. *et al*. Índice geotécnico de cavernas (IGC): um enfoque empírico para classificação de cavernas em litologias ferríferas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas, SP. **Anais** [...]. Campinas, SP, 15 a 18 de setembro de 2020.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. *In*: **Planalto**. Brasília, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 21 dez. 2023.

BRITO NEVES, B. B.de *et al*. A evolução geoecológica da Cordilheira do Espinhaço: dados novos e integração. **Rev. Bras. Geoc.**, v. 9, n. l, p. 71–85, 1979.

DUTRA, G. **Análise de susceptibilidade de duas cavidades em litologia de ferro na Serra do Gandarela, MG**: estudo de caso: AP_0009 e AP_0038. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

ENDO, I.; SILVA, L. G.; ZAVAGLIA, G. **Estratigrafia e arcabouço estrutural**

do Complexo Ferrífero Brucutú – Dois Irmãos – segmento NE do sinclinal Gandarela. [*S. l.: s. n.*], 2004. 20p. Relatório.

FERNANDES, A. B. **Sistema de monitoramento de dinâmica de rocha (SMDR) aplicado ao controle geotécnico de uma cavidade natural subterrânea no município de São Gonçalo do Rio Abaixo – MG**. 2020. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

FIORI, A.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânicas dos solos e das rochas**: aplicações na estabilidade de taludes. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2009.

FOSSEN, H. **Geologia Estrutural**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock Mechanics**: an introduction to the principles. Amsterdam: Elsevier Science, 1997.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. [ICMBio (2022)]. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2022**. Brasília: ICMBio, 2022. Disponível em: https://encurtador.com.br/DcbQu. Acesso em: 21 dez. 2023.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. [ISRM (1978)]. Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 15, n. 6, 1978.

JORDÁ-BORDEHORE, L. Aportación a la evaluación de la estabilidad de cuevas naturales mediante métodos empíricos y clasificaciones geomecánicas, primeros resultados. *In*: ANDREO, B.; DURÁN, J. J. **El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial**. Nerja: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 2016. p. 528.

MILNE, D. M. **Underground design and deformation based on surface geometry**. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of British Columbia, Vancouver, 1997.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Instrução de Serviço Sisema 08/2017**. Dispõe sobre procedimentos para análise dos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos e de atividades efetiva ou potencialmente causadoras de impactos sobre cavidades naturais subterrâneas. Belo Horizonte, 5 jun. 2017. Disponível em: https://encurtador.com.br/sImGc. Acesso em: 19 dez. 2023.

NOCE, T. S. **Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas**. 2016. 203 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

OLIVEIRA, P. C. L. **Avaliação da aplicação de sistemas de classificação geomecânica para cavidades ferruginosas**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

OLIVEIRA, P. L.; LIMA, H. M. de. Correlations of rock mass classifications applied to ferruginous caves. **REM – International Engineering Journal**, v. 73, n. 2, p. 267–272, 2020.

OSBORNE, R. A. L. Cave breakdown by vadose weathering. **International Journal of Speleology**, v. 31, p. 37–53, 2002.

PATCHING, T. H.; COATES, D. F. A recommended rock classification for rock mechanics purposes. **CIM Bull. Oct.**, p. 1195–1197, 1968.

TOGNON, A. A. (ed.). **Glossário geral de termos técnicos de geologia de engenharia e ambiental**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2012.

VALENTIM, R. F. **Classificação geomecânica da cavidade natural subterrânea BRU_0005, município de São Gonçalo do Rio Abaixo, MG**. 2016. 152 f. Dissertação [Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica] – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

WHITE, E. L. B. *In*: WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (eds.). **Encyclopedia of caves**. Amsterdã: Elservier, 2012. **966p.**



Foto/Photo: André B. Machado

7



Caverna na região da Serra dos Carajás / Cave in the Serra dos Carajás
Foto/Photo: André B. Machado

Monitoramento fotográfico em cavernas ferríferas

ANDRÉ BERNARDES MACHADO
ALLAN CALUX

1 INTRODUÇÃO

A invenção da fotografia, que logo completará dois séculos, contribuiu, e muito, para a evolução dos estudos e o aprimoramento dos conceitos no âmbito das ciências naturais. A busca incessante do homem por registros na natureza não deixou de lado nem mesmo os habitats mais inóspitos do planeta, como as profundezas do oceano, os desertos e as cavernas.

O conceito básico sobre a fotografia discorre sobre como usar a luz para registrar uma imagem através de uma câmera, onde cada imagem gerada concentra a memória do momento registrado. Para Boris Kossoy (1999) "a imagem de qualquer objeto ou situação documentada pode ser dramatizada ou estetizada, de acordo com a ênfase pretendida pelo fotógrafo, em função da finalidade ou aplicação a que se destina".

Em território brasileiro, a prática da fotografia em ambientes cársticos remonta às primeiras expedições do alemão Sigismund Ernst Richard Krone nas grutas do Arataca e Monjolinhos, no sul do estado de São Paulo no final do século XIX e início do século XX (Figura 1). As imagens retratadas possuíam caráter documental e correspondem aos primeiros registros fotográficos de cavernas brasileiras. Ao longo do século XX, os grupos de espeleologia, começando com a Sociedade Excursionista de Espeleológica – SEE, trouxeram a conhecimento público milhares de fotografias de cavernas que foram publicadas em revistas, artigos e atualmente nas mídias digitais.

Atualmente, a fotografia é uma prática rotineira associada à espeleologia desde o momento da descoberta da caverna, passando pela exploração e topografia, pelos estudos de biologia subterrânea, geoespeleologia e demais estudos complementares. Em cavidades naturais subterrâneas essa prática tornou-se ainda uma ferramenta fundamental para avaliação do estado de conservação desses ecossistemas, contribuindo para a avaliação de eventuais alterações físicas no maciço rochoso e dentro das cavernas.

Photographic monitoring in ferriferous caves

ANDRÉ BERNARDES MACHADO
ALLAN CALUX

1 INTRODUCTION

The invention of photography, which will soon complete two centuries, contributed greatly to the evolution of studies and the improvement of concepts within the natural sciences. Humankind's incessant search for records in nature has not left aside even the most inhospitable habitats on the planet, such as the depths of the ocean, deserts and caves.

The basic concept of photography pertains to using light to record an image through a camera, whereby each generated image concentrates the memory of the recorded moment. For Boris Kossoy (1999), "the image of any documented object or situation can be dramatized or aestheticized, according to the emphasis intended by the photographer, depending on the purpose or application for which it is intended".

The practice of photography in Brazilian karst environments dates back to the first expeditions of the German Sigismund Ernst Richard Krone in Arataca and Monjolinhos caves, in the south of the state of São Paulo, at the end of the 19th century and beginning of the 20th (Figure 1). The images portrayed were documentary in nature and correspond to the first photographic records of Brazilian caves. Throughout the 20th century, caving groups, starting with the Sociedade Excursionista de Espeleológica (SEE), brought to public attention thousands of photographs of caves, which were published in magazines, articles and, currently, in digital media.

Photography is now a routine practice associated with speleology, from the moment a cave is discovered through its exploration and studies of topography, subterranean biology, geospeleology and other complementary investigations. This practice has also become a fundamental tool for assessing the conservation status of cave ecosystems, contributing to the assessment of possible physical changes in the rock mass and interior.

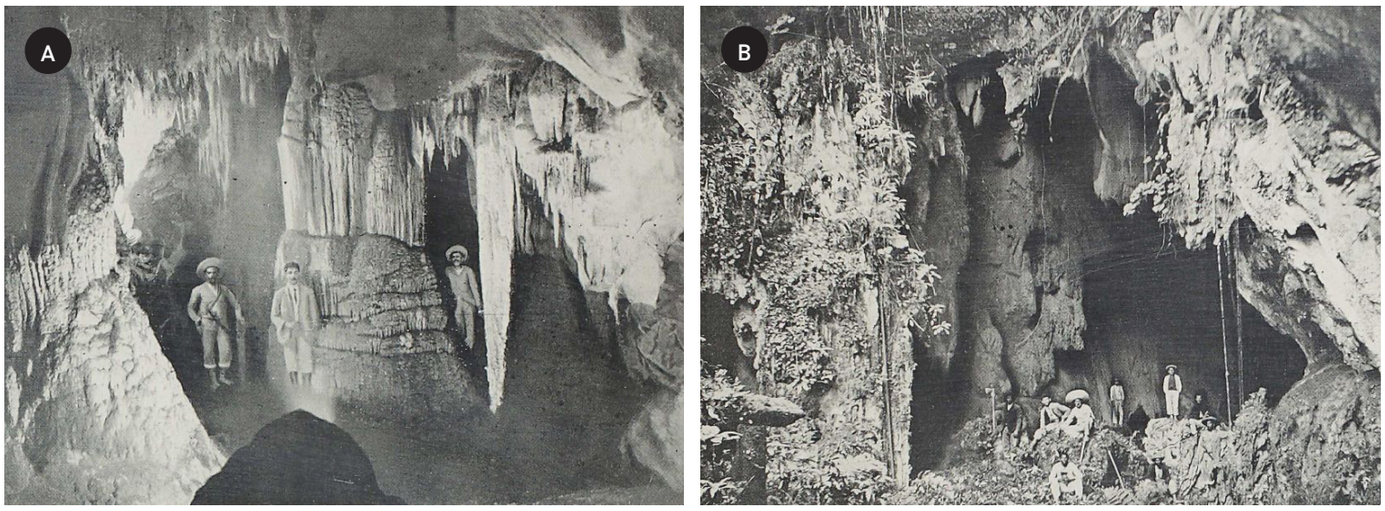


Figura 1: Expedições de Richard Krone para: A) Gruta do Monjolinho e B) Gruta do Arataca. Fonte: O Carste, 2007.
Figure 1: Richard Krone's expeditions to: A) Monjolinho cave and B) Arataca cave. Source: O. Carste (2007).

Nesse contexto, cada foto, tomada por um fotógrafo distinto, representa um momento único e um grande desafio à representação temporal. Portanto, a repetição da mesma imagem em épocas diferentes ou por fotógrafos diversos é o maior desafio em termos de monitoramento.

Este capítulo foi elaborado a partir do aprendizado de, pelo menos, oito anos de monitoramento fotográfico em centenas de cavernas ferríferas da região da Serra dos Carajás, no Estado do Pará, e outras dezenas na região do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais.

Desta forma, pretende-se compartilhar as boas práticas desenvolvidas, permitindo a sua replicação em cavernas de diferentes litologias e em diferentes empreendimentos.

2 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE FOTOGRAFIA EM CAVERNAS

Para que seja possível o registro das cavidades naturais subterrâneas com características muito heterogêneas, técnicas amplamente difundidas na fotografia de estúdio, de natureza e esportiva foram adaptadas, resultando na criação de um método que garante a replicação da mesma imagem ao longo do tempo, permitindo a identificação de alterações físicas (morfológicas) ou mesmo ambientais, como a presença de corpos hídricos ou de substratos orgânicos (guano, folhiço, entre outros). Tais adaptações e o método aplicado serão descritos a seguir.

In this context, each photo, taken by a different photographer, represents a unique moment and a great challenge for temporal representation. Therefore, the repetition of the same image at different times and/or by different photographers is the biggest challenge in terms of monitoring.

This chapter was prepared based on learning from at least eight years of photographic monitoring in hundreds of ferriferous caves in the Serra dos Carajás region of the state of Pará, and dozens more in the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle) region of the state of Minas Gerais.

In this way, the aim is to share the good practices developed, allowing them to be replicated in caves of different lithologies and in different enterprises.

2 PRINCIPAL CAVE PHOTOGRAPHY TECHNIQUES

To make it possible to record caves with very heterogeneous characteristics, techniques widely used in studio, nature and sports photography have been adapted. This resulted in the creation of a method that guarantees the replication of the same image over time, allowing the identification of physical (morphological) or even environmental changes, such as the presence of water bodies or organic substrates (guano, leaf litter, etc.). Such adaptations and the method applied will be described below.

A escolha das marcas e tipos dos equipamentos é pessoal. No entanto, é necessário estar atento para a importância de utilizar equipamentos com a mesma especificação do início ao fim do monitoramento para replicação de fotos.

A técnica que usa luz ambiente ou natural, amplamente usada na fotografia de natureza, é utilizada para o registro da entrada das cavernas, utilizando-se de flash para iluminar, sempre que possível, a zona de penumbra ocasionada pela diminuição de luz natural.

A técnica da "pintura", amplamente utilizada na espeleologia esportiva, não deve utilizada nesse contexto. Ela foi testada e reprovada nos primeiros monitoramentos fotográficos no quesito repetição, pois a iluminação manual com a utilização de lanternas ou mesmo flash não permite a replicação exata de direção e intensidade de luz, dificultando a geração de imagens semelhantes ao longo do tempo. A falta de precisão na manipulação dos equipamentos de iluminação gera sombras que dificilmente podem ser repetidas.

Por outro lado, a iluminação com projetores de LEDs (Light Emitting Diode, ou, Diodo Emissor de Luz, em português) é uma excelente opção, por se tratar de uma iluminação contínua. Segundo Zogbi & Calux (2017), com esta técnica o fotógrafo observa por meio de sua lente objetiva, podendo definir exatamente onde posicionar a luz, e o resultado é muito próximo do que o fotógrafo observou no momento de apertar o gatilho. O inconveniente é que os projetores de LED são volumosos e delicados, não sendo recomendados para cavernas com muitos obstáculos e estreitamentos, que são extremamente comuns em cavernas ferríferas.

Por sua vez, a utilização de flash frontal, como conhecemos em câmeras compactas e celulares, é obviamente a forma mais fácil de registar imagens onde a falta de luz predomina no ambiente. Contudo, vários fatores podem limitar a empregabilidade dessa técnica, entre elas vale destacar a poeira ou partículas em suspenção (Figura 2), o excesso de umidade (Figura 3), a perspectiva de relevo achatado ou chapado (Figura 4), sombras nítidas ou ilusórias (Figura 5), entre outros.

Finalmente, a utilização do flash sincronizado à câmera possibilitou a repetição das fotografias com o menor índice de erro. Devido à capacidade prática de manipulação da luz e à exatidão no posicionamento, a repetição e comparação dos momentos fotográficos tornam-se possíveis. Sendo assim, esse método será detalhado a seguir.

The choice of brands and types of equipment is personal. However, it is necessary to be aware of the importance of using equipment with the same specifications from the start to the finish of monitoring for photo replication.

The technique that uses ambient or natural light, widely used in nature photography, is used to record cave entrances, with flash to illuminate, whenever possible, the penumbra zone caused by the decrease in natural light.

The "painting" technique, widely used in sport speleology, should not be used in this context. It was tested in the first photographic monitoring and failed in terms of repetition, as manual lighting using flashlights or even a flash does not allow the exact replication of the direction and intensity of light, making it difficult to generate similar images over time. The lack of precision in handling lighting equipment creates shadows that are difficult to repeat.

On the other hand, lighting with LED projectors (Light Emitting Diode, or Diodo Emissor de Luz, in Portuguese) is an excellent option, as it provides continuous lighting. According to Zogbi & Calux (2017), with this technique the photographer observes through the objective lens and can define exactly where to position the light, with a result that is very close to what is observed when pressing the trigger. The drawback is that LED projectors are bulky and delicate, and so are not recommended for caves with many obstacles and narrowings, which are extremely common in ferriferous caves.

In turn, using a front flash, as we know it on compact cameras and cell phones, is obviously the easiest way to record images where a lack of light predominates in the environment. However, several factors can limit the use of this technique, among which it is worth highlighting dust or suspended particles (Figure 2), excess humidity (Figure 3), a flat relief perspective (Figure 4), and sharp or illusory shadows (Figure 5), among others.

Finally, the use of a flash synchronized to the camera makes it possible to repeat photographs with the lowest error rate. The practical ability to manipulate light and the accuracy in positioning makes the repetition and comparison of photographic moments possible. Therefore, this method will be detailed below.



Figura 2: Partículas em suspensão em cavidade natural subterrânea da região de Carajás, estado do Pará. Fonte: Brandt (2014).
Figure 2: Particles in suspension in a cave in the Carajás region, state of Pará. Source: Brandt (2014).



Figura 3: Foto em local com excesso de umidade em cavidade natural subterrânea da região de Carajás, estado do Pará. Fonte: Brandt (2014).
Figure 3: Photo in a place with excess humidity in a cave in the Carajás region, state of Pará. Source: Brandt (2014).



Figura 4: Relevo sem profundidade na cavidade natural subterrânea N5S–0063, região de Carajás, estado do Pará. Fonte: Brandt (2015).
Figure 4: Relief without depth in cave N5S–0063 in the Carajás region, state of Pará. Source: Brandt (2015).



Figura 5: Sombras geradas pela utilização de um flash frontal de baixa potência em cavidade natural subterrânea da região de Carajás, estado do Pará. Fonte: Brandt (2014).
Figure 5: Shadows generated using a low-power frontal flash in a cave in the Carajás region, state of Pará. Source: Brandt (2014).

3 TÉCNICAS APLICADAS DE MONITORAMENTO FOTOGRÁFICO

3.1 Escolha e marcação dos pontos de monitoramento

O monitoramento fotográfico em cavidades naturais subterrâneas possui como princípio básico a possibilidade de replicação dos registros fotográficos ao longo do tempo (campanhas de campo estipuladas em intervalos regulares ou não). Visando a acurácia, recomenda-se a criação de pontos fixos de localização do tripé, nomeados como ponto fotográfico, conectados a outros marcos de localização chamados de ponto alvo (Figura 6).

Os pontos fotográficos devem ser fixos até o final do monitoramento. Sendo assim, podem ser instaladas estacas no solo nas quais podem ser colocadas placas de aço contendo a identificação do ponto fotográfico, como o nome da caverna seguido de uma letra de acordo com a ordem das fotografias executadas (Exemplo: CAV–0031–A) e fita de marcação que possua cor que se destaque em relação à paisagem (Figura 7). Nos casos de locais com alta densidade de matéria orgânica, a localização do ponto pode ficar comprometida. Assim, o uso de cores vibrantes nos locais demarcados também é recomendado.

3 APPLIED PHOTOGRAPHIC MONITORING TECHNIQUES

3.1 Choosing and marking monitoring points

The basic principle of photographic monitoring in caves is the possibility of replicating photographic records over time (field campaigns stipulated at regular intervals or not). Aiming for accuracy, it is recommended that fixed tripod location points be established, called photographic points, connected to other location landmarks called target points (Figure 6)

Photographic points must be fixed until the end of monitoring. Therefore, stakes can be installed in the ground on which steel plates can be placed containing the identification of the photographic point, such as the name of the cave followed by a letter according to the order of the photographs taken (Example: CAV–0031–A) and marking tape that has a color that stands out in relation to the landscape (Figure 7). In cases of locations with a high density of organic matter, the location of the point may be compromised. Therefore, the use of vibrant colors in demarcated areas is also recommended.

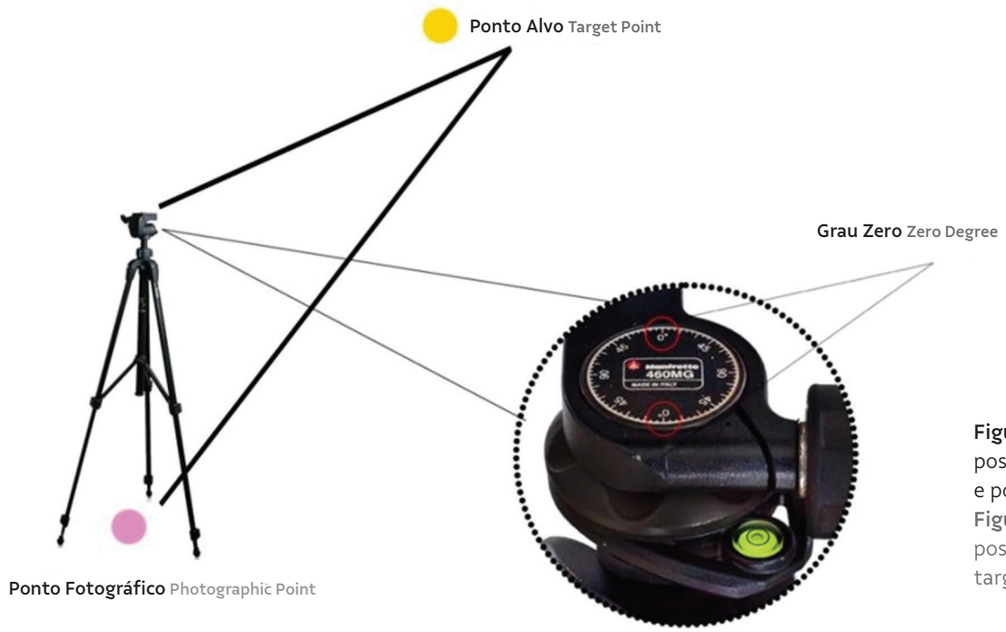


Figura 6: Esquema representativo do posicionamento do ponto fotográfico e ponto alvo. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 6: Representative diagram of the positioning of photographic point and target point. Source: Brandt (2017).



Figura 7: Ponto fotográfico afixado com estaca, fita de marcação de fácil visualização e placa de aço contendo a identificação da base fotográfica. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 7: Photographic point affixed with a stake, easy-to-view marking tape and steel plate containing the identification of the photographic point. Source: Brandt (2017).



Figura 8: Ponto alvo afixado, fita de marcação de cor amarela e placa de aço contendo sua identificação. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 8: Affixed target point, yellow marking tape and steel plate containing its identification. Source: Brandt (2017).

O ponto alvo deve ser marcado de acordo com o grau zero da cabeça do tripé fotográfico, que apontará a direção entre o ponto fotográfico e o ponto alvo. O ponto alvo deve ter a letra de acordo com a identificação de seu ponto fotográfico, porém com a utilização de uma fita de cor vibrante de outra tonalidade em relação à fita da base fotográfica (Figura 8).

Não há a necessidade do uso de bússola para fazer visada entre o ponto fotográfico e o ponto alvo, uma vez que, em geral, cavernas associadas à formação ferrífera apresentam elevado magnetismo nesse tipo litológico. Em outras litologias onde não forem constatadas interferências, recomenda-se o uso da bússola.

A técnica de monitoramento deverá seguir um padrão que ofereça o máximo de detalhes possíveis sobre entradas, condutos, salões e estruturas das cavidades naturais

The target point should be marked according to the zero degree of the photographic tripod head, which will point in the direction between the photographic point and the target point. The target point must have the letter in accordance with the identification of its photographic point, but with the use of a vibrant color ribbon of a different shade in relation to the photographic base tape (Figure 8).

There is no need to use a compass to aim between the photographic point and the target point, since, in general, caves associated with iron formations have high magnetism in this lithological type. The use of a compass is recommended In other lithologies where interference is not found.

The monitoring technique must follow a standard that offers as much detail as possible about entrances, conduits, halls and structures of caves. In order for there to be a replicable

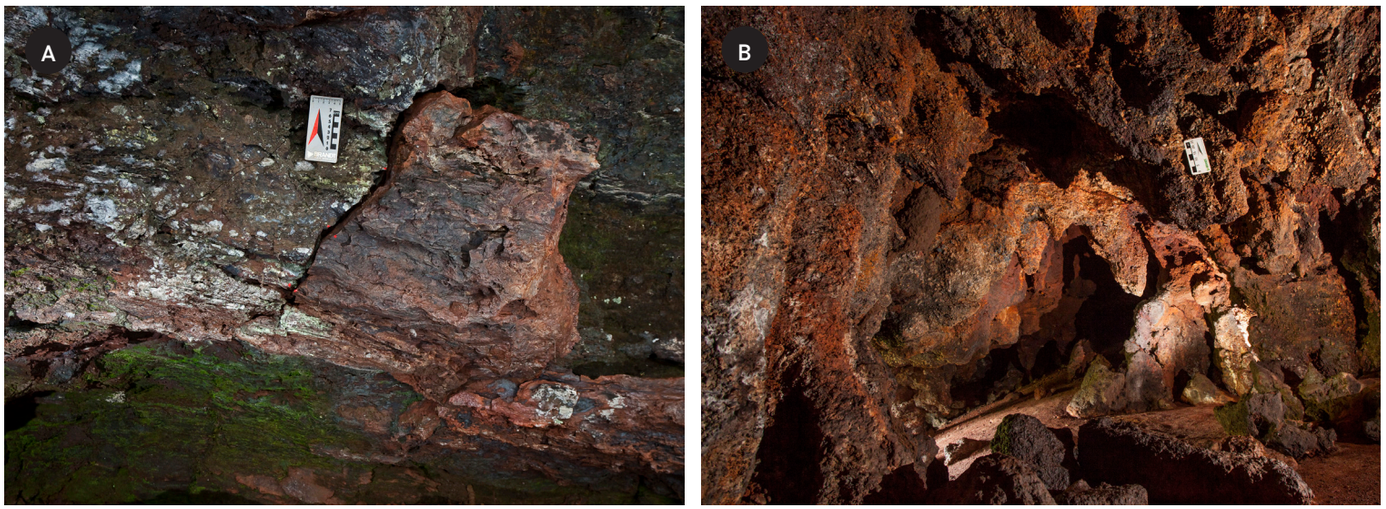


Figura 9: A: Escala pequena afixada na parede da cavidade. B: Escala grande na entrada do conduto. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 9: A: Small scale affixed to cave wall. B: Large scale at conduit entrance. Source: Brandt (2017).

subterrâneas. Para que exista um padrão replicável, devem ser utilizadas duas escalas para a produção das imagens, uma com 10 centímetros de altura e cor cinza para imagens de detalhes (Figura 9A), e outra com 30 centímetros de altura e cor branca para planos mais abertos (Figura 9B). As escalas possuem diferentes cores para que o visualizador das imagens tenha uma referência do tamanho, pois as escalas podem estar longe perdendo a nitidez da visualização numérica.

Importante destacar que em algumas situações é desejável o uso de escala humana. A Figura 10 traz um exemplo desse uso. Nesse exemplo é fácil perceber a importância da escala humana, mesmo diante da dificuldade de replicação durante o monitoramento. Isto porque o olhar humano está acostumado com a vista do cotidiano, a escala humana pode ser usada para demonstrar a grandeza de entradas de cavernas ou volumes de grandes salões, como demonstrada na comparação apresentada na Figura 11.

Outro aspecto importante é que as fotografias devem conter sua localização espacial e pontos alvos das fotos para que o trabalho possa ser replicado, independentemente da presença do fotógrafo executor do diagnóstico inicial. Ressalta-se que é de suma importância que a plotagem dos pontos em planta baixa da caverna seja realizada quando a fotografia final do ponto é escolhida *in loco*. A plotagem desses pontos no mapa, posteriormente à conclusão do levantamento fotográfico, compromete a acurácia do monitoramento (Figura 12).

pattern, two scales must be used to produce the images, one 10 centimeters high and gray for detail images (Figure 9A), and the other 30 centimeters high and white for more open plans (Figure 9B). The scales have different colors so that the image viewer has a reference to the size, as the scales can be far away, losing the clarity of numerical visualization.

It is important to highlight that in some situations it is desirable to use a human scale. Figure 10 shows an example where it is easy to see the importance of the human scale, even given the difficulty of replication during monitoring. Since the eye is accustomed to everyday view, the human scale can be useful for demonstrating the grandeur of cave entrances or volumes of large halls, as demonstrated in the comparison presented in Figure 11.

Another important aspect is that the photographs must contain their spatial location and target points in the photos so that the work can be replicated, regardless of the presence of the photographer carrying out the initial diagnosis. It is extremely important that the points be plotted on the floor plan of the cave when the final photograph of the point is chosen *in loco*. Plotting these points on the map, after completing the photographic survey, compromises monitoring accuracy (Figure 12).



Figura 10: Foto com escala humana e escala gráfica. **Figure 10:** Photo with human and graphic scales.



Figura 11: A) Foto com escala "apagada"; B) Foto com escala centimétrica impressa; C) Foto com escala humana. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 11: A) Photo with "erased" scale; B) Photo with printed centimeter scale; C) Photo with human scale. Source: Brandt (2017).

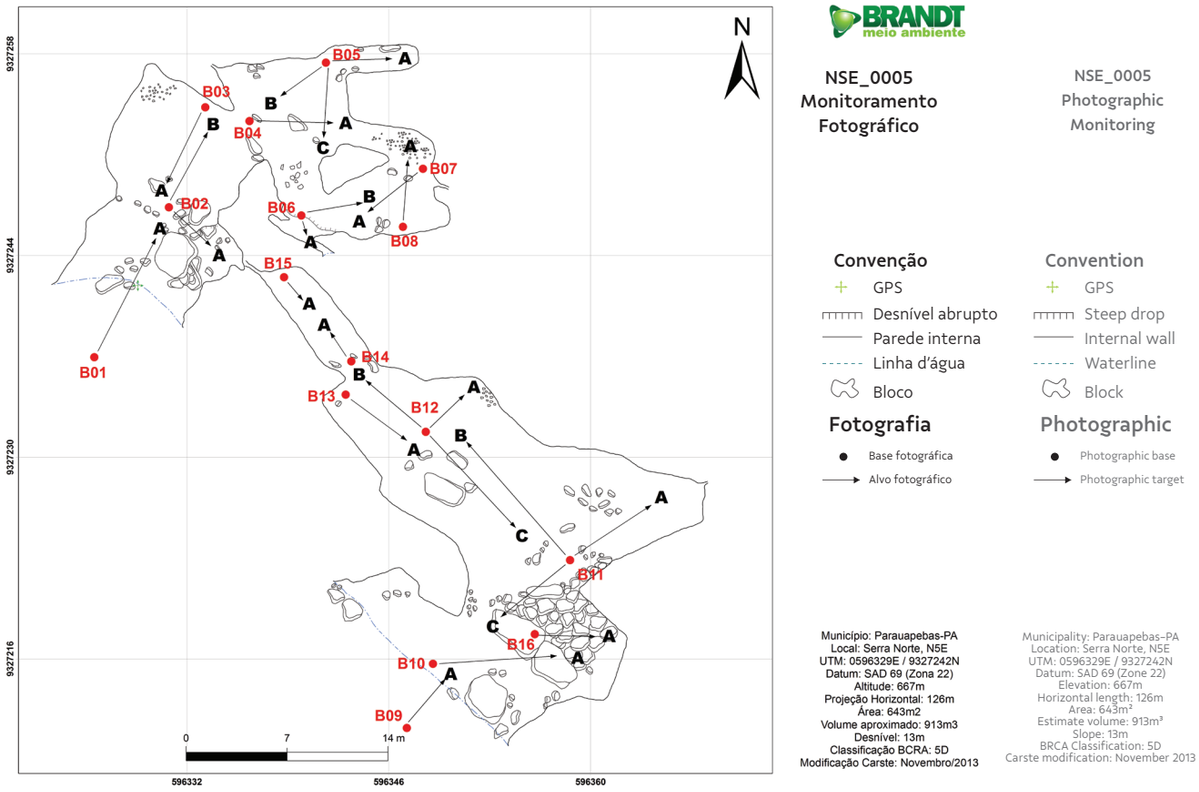


Figura 12: Espacialização dos pontos/bases e alvos de monitoramento fotográfico na cavidade natural subterrânea N4E–0005, Serra dos Carajás, Parauapebas, Pará. Fonte: Brandt, 2019.
Figure 12: Spatialization of points/bases and photographic monitoring targets in the cave N4E–0005, Serra dos Carajás, Parauapebas, state of Pará. Source: Brandt (2019).

Para a definição das bases fotográficas, recomenda-se que a primeira campanha de monitoramento fotográfico (*background*) ocorra concomitantemente com o inventário geoestrutural, sendo dado enfoque aos pontos que a equipe técnica de geoestrutural definiu como zonas frágeis no interior das cavernas e importantes de serem monitorados. Os pontos definidos no diagnóstico fotográfico serão continuamente monitorados em campanhas posteriores para avaliação de alterações ou não das feições geoestruturais identificadas.

3.2 Anotações dos dados fotográficos

As anotações dos dados fotográficos são extremamente importantes para a replicação das imagens ao longo do tempo e devem ser feitas, por exemplo, de acordo com a ficha apresentada na Figura 13, no momento em que a foto final daquele ponto é concluída.

To define the photographic bases, it is recommended that the first photographic monitoring campaign (background) occurs simultaneously with the geostructural inventory, focusing on the points that the geostructural technical team define as fragile areas inside the caves and important to be monitored. The points defined in the photographic diagnosis will be continuously monitored in subsequent campaigns to assess whether or not changes have occurred to the identified geostructural features.

3.2 Annotations of photographic data

Annotations of photographic data are extremely important for the replication of images over time and must be made, for example, according to the form shown in Figure 13, at the moment the final photo of that point is completed.

A seguir, a Tabela 1 mostra uma descrição prática dos itens técnicos apresentados na ficha de dados fotográficos de campo.

Below, Table 1 shows a practical description of the technical items presented in the field photographic data form.

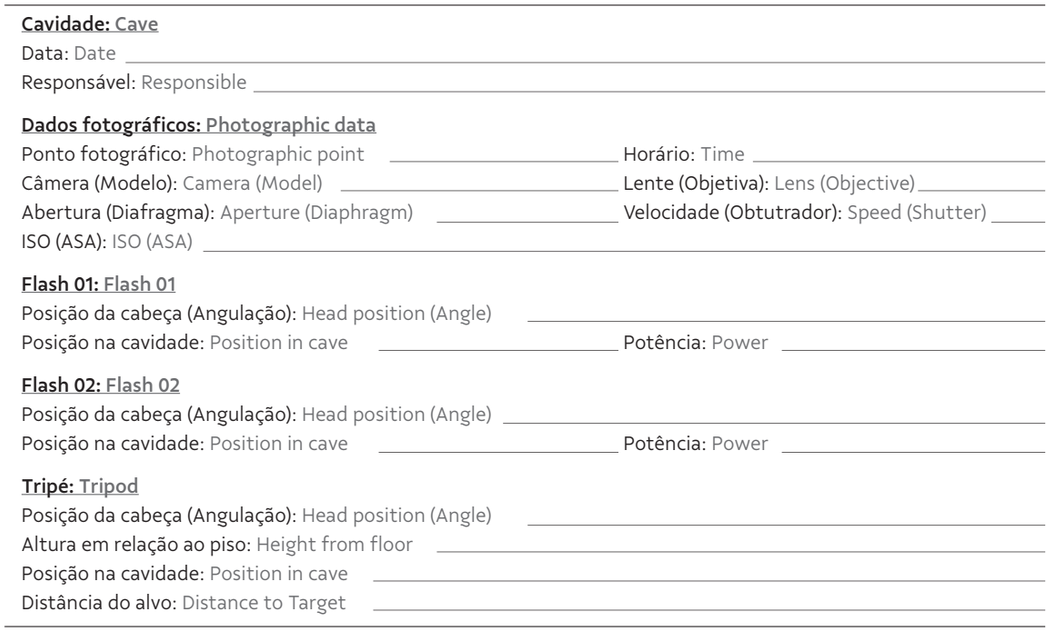


Figura 13: Exemplo de Ficha de campo para anotação de dados fotográficos.
Figure 13: Example of a field form for annotating photographic data.

Tabela 1: Descrição sumarizada com os itens que devem ser anotados durante o levantamento fotográfico.
Table 1: Brief description with items that must be noted during the photographic survey.

Dados gerais General data	
Cavidade Cave	Nomenclatura pré-existente da cavidade alvo do trabalho; Pre-existing nomenclature of the cave targeted by the work;
Data Date	Dia, mês e ano de realização da imagem; Day, month and year the image was taken;
Responsável Responsible	Fotógrafo que será responsável pela produção da imagem; Photographer who will be responsible for producing the image;
Dados fotográficos Photographic data	
Ponto fotográfico Photographic point	Local onde está alocado do tripé cuja nomenclatura corresponde ao nome da cavidade seguido de uma letra em ordem alfabética; Location where the tripod is located, with nomenclature that corresponds to the name of the cave followed by a letter in alphabetical order;
Horário Time	Hora e minuto em que foi realizada a fotografia. Esta informação é muito importante para imagens que usarão luz natural da entrada ou de claraboias e para a zona de penumbra; Time and minute the photograph was taken. This information is very important for images that will use natural light from the entrance or skylights and for the penumbral zone;
Câmera (Modelo) Camera (Model)	Tipo de máquina fotográfica utilizada para obtenção das imagens; Type of camera used to obtain images;
Lente (Objetiva) Lens (Objective)	Distância focal utilizada na fotografia; Focal distance used in photography;

Abertura (Diafragma) Aperture (Diaphragm)	Anel que controla entrada de luz para a formação da imagem; Ring that controls the entry of light to form the image;
Velocidade (Obturador) Speed (Shutter)	Tempo de exposição na produção da imagem; Exposure time for image production;
ISO (ASA) ISO (ASA)	Sensibilidade da superfície fotossensível ou índice de exposição; Sensitivity of the photosensitive surface or exposure index;
Dados dos Flashes Flash data	
Posição da cabeça (Angulação) Head position (Angle)	Grau de inclinação da cabeça do flash; Degree of inclination of flash head;
Posição na cavidade Position in cave	Distância e angulação da posição do flash em relação ao ponto fotográfico; Distance and angle of flash position in relation to the photographic point;
Potência Power	Carga de luz do flash disparada no momento da produção da imagem; Load of the light of the flash fired at the time of image production;
Dados do tripé Tripod data	
Posição da cabeça (Angulação) Head position (Angle)	Grau de inclinação da cabeça do tripé em relação ao ponto a ser fotografado; Degree of inclination of tripod head in relation to the point to be photographed;
Distância do alvo Distance to target	Distância medida entre o centro da base do tripé, onde está o ponto fotográfico e o ponto alvo; Distance measured between the center of the tripod base, where the photographic point is located, and the target point;
Altura em relação ao piso Height from floor	Distância medida entre a cabeça do tripé ou a base da câmera até o solo, onde está o ponto fotográfico; Distance measured between tripod head or camera base and the ground where the photographic point is located;
Posição na cavidade Position in cave	Local onde o tripé está situado em relação ao mapa da cavidade. Location of the tripod in relation to the cave map.

Em caso de uso de projetores de LED de iluminação é necessário adicionar um campo para anotação da intensidade de luz e de dados da localização dentro da caverna, assim como os usados para o flash. Em monitoramento fotográfico de cavernas ferríferas da Serra dos Carajás, estado do Pará, foi constatado que "a adição de um painel fotográfico de LED possibilitou uma mudança na técnica de iluminação, a qual teve um forte impacto na captação das cores reais no interior das cavernas. Além de contribuir com mais luz, o painel mostrou-se muito útil durante o posicionamento do quadro, agilizando o trabalho na tomada da foto" (Ativo Ambiental, 2020). A adição de um painel de LEDs auxilia a visualização local para melhor enquadramento da foto possibilitando a agilidade no processo. No entanto, esses painéis de LED portáteis, usados hoje para os monitoramentos, possuem incidência de luz inferior aos flashes usados em suas potências mais altas.

Como dito anteriormente, os equipamentos utilizados (câmeras, lentes, flashes, controles para disparo remoto, tripés

When using LED lighting projectors, a field needs to be added to record data for light intensity and location inside the cave, as well as those used for the flash. During photographic monitoring of ferriferous caves in Serra dos Carajás, state of Pará, it was found that "the addition of an LED photographic panel enabled a change in the lighting technique, which had a strong impact on capturing the true colors inside the caves. In addition to providing more light, the panel proved to be very useful when positioning the frame, speeding up the work of taking the photo" (Ativo Ambiental, 2020). The addition of an LED panel helps local viewing to better frame the photo, making the process faster. However, these portable LED panels, used today for monitoring, have a lower incidence of light than flashes used at their highest powers.

As previously stated, the equipment used (cameras, lenses, flashes, remote shooting controls, tripods and tripod heads)

e cabeças de tripés) devem permanecer os mesmos durante todo o monitoramento fotográfico, a fim de evitar diferenças na execução e na qualidade do material produzido. Caso seja necessário substituí-los por motivos fortuitos, é mandatório que as especificações técnicas sejam as mesmas.

Os dados de composição das imagens (ISO, abertura do diafragma, velocidade do obturador, potência do flash, objetiva utilizada, horário de produção da imagem, posição da cabeça do tripé, posição das cabeças dos flashes, bem como o posicionamento dos mesmos na cavidade) estarão registrados na mesma caderneta de anotações de campo para garantir um controle do trabalho fotográfico durante todas as campanhas. No caso da imagem da entrada da caverna, a variação de luz e a coloração da vegetação são fatores que irão gerar diferenças entre as imagens do diagnóstico (*background*) e monitoramentos seguintes, o que é considerado natural.

3.3 Escolha e uso adequados dos equipamentos

De forma geral, o kit de iluminação deve contar com o mínimo de duas unidades de flash para garantir uma melhor distribuição de luz, visando oferecer a percepção dos detalhes morfológicos das galerias fotografadas. Os flashes devem ser distribuídos de maneira a oferecer uma iluminação homogênea do ponto definido.

Os equipamentos fotográficos rotineiramente utilizados nos monitoramentos são os abaixo listados:

- Câmera com sensor *full frame*;
- Lente grande angular;
- 02 flashes com RT (*radio transmition*);
- 02 mini tripés para os flashes;
- Transmissor (flash);
- Tripé e cabeça (Com nível e angulação);
- Cabo disparador.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Como principal resultado do monitoramento fotográfico, recomenda-se a elaboração de um "book fotográfico" para cada caverna, que pode ser utilizado no campo para as etapas posteriores ao monitoramento, inclusive de apoio para outros temas, como na Análise de Integridade Física, no Controle de Drenagens, nos Cortes e Aterros e no Monitoramento de Vibrações.

must remain the same throughout the photographic monitoring to avoid differences in the execution and quality of the material produced. If it is necessary to replace them for unforeseen reasons, it is mandatory that the technical specifications are the same.

Image composition data (ISO, aperture, shutter speed, flash power, lens used, picture production time, tripod head position, flash heads position, as well as their positioning in the cave) will be recorded in the same field annotations notebook to ensure control during all campaigns. In the case of the image of the cave entrance, the variation in light and the color of the vegetation are factors that will generate differences between the diagnostic images (background) and subsequent monitoring, which is considered natural.

3.3 Appropriate choice and use of equipment

In general, the lighting kit must have a minimum of two flash units to ensure better light distribution, aiming to provide a perception of the morphological details of the photographed galleries. The flashes must be distributed in such a way as to provide homogeneous illumination of the defined point.

The photographic equipment routinely used in monitoring is as follows:

- Camera with full frame sensor;
- Wide angle lens;
- 02 flashes with RT (radio transmission);
- 02 mini tripods for flashes;
- Transmitter (flash);
- Tripod and head (with level and angulation);
- Trigger cable.

4 PRESENTATION OF RESULTS

As the main result of photographic monitoring, a "photographic book" should be assembled for each cave, which can be used in the field for subsequent stages of monitoring, including support for other topics, such as physical integrity analysis, drainage control, cuts and landfills, and vibration monitoring.

O "book fotográfico" apresenta os resultados das campanhas para a produção das imagens do diagnóstico, coletas dos dados e monitoramentos posteriores. As informações geradas na primeira etapa servirão como base de comparação nas campanhas futuras, em que as imagens deverão ser reproduzidas utilizando os dados dos mesmos pontos fotográficos. Deverão ser respeitados também o mesmo tratamento e formatação final para que as imagens dos mesmos pontos, após serem sobrepostas, possam servir como ferramenta de monitoramento (comparação) das cavidades naturais subterrâneas (Figura 14 e Figura 15).

The "photographic book" presents the results of campaigns to produce diagnostic images, collect data and perform subsequent monitoring. The information generated in the first stage will serve as a basis for comparison of future campaigns, in which the images must be reproduced using data from the same photographic points. The same treatment and final formatting must also be respected so that the images of the same points, after being superimposed, can serve as a monitoring tool (comparison) of caves (Figure 14 and Figure 15).

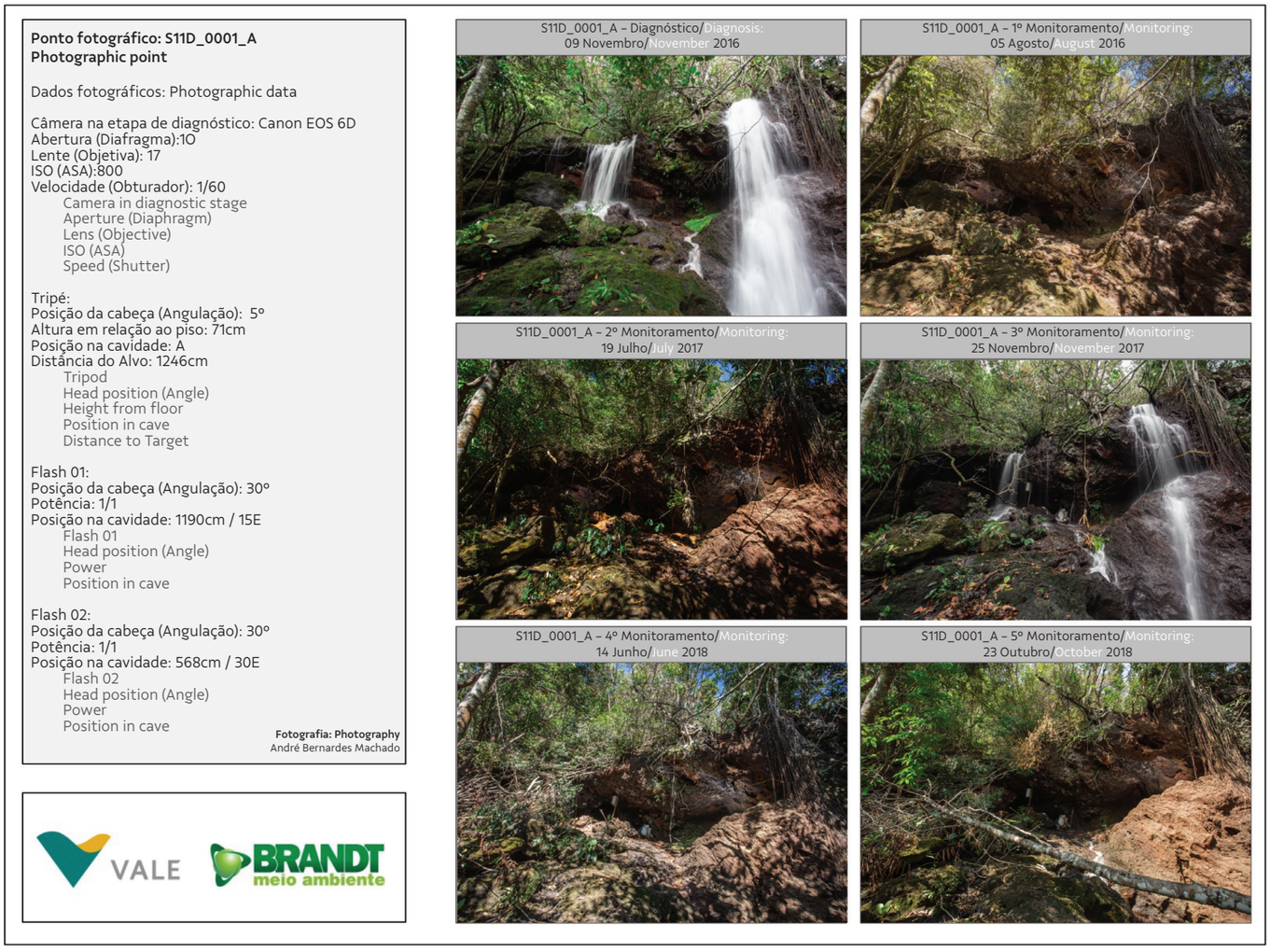


Figura 14: Exemplo de "book fotográfico" desde o diagnóstico até a 5ª campanha de monitoramento do ponto da entrada (vista externa) da cavidade S11D–0001 em períodos de chuva e seca. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 14: Example of a "photographic book" from diagnosis to the fifth monitoring campaign of the entry point (external view) of cave S11D–0001 in rainy and dry periods. Source: Brandt (2017).

Por meio dos registros fotográficos é possível não só o monitoramento de impactos nas cavidades naturais subterrâneas, mas também na área do entorno. Além disso, aspectos sazonais das estações seca e úmida (presença de drenagens, poças, cachoeiras etc.) também podem fornecer informações importantes para uma melhor compreensão do ecossistema cavernícola monitorado, bem como sobre alterações em relação à sua estrutura e à composição da fauna, por exemplo.

Photographic records make it is possible to not only monitor impacts in caves, but also in the surrounding area. Furthermore, seasonal aspects of dry and wet periods (presence of drainages, puddles, waterfalls, etc.) can also provide important information for a better understanding of the ecosystem of a monitored cave, as well as changes in relation to its structure and faunal composition, for example.

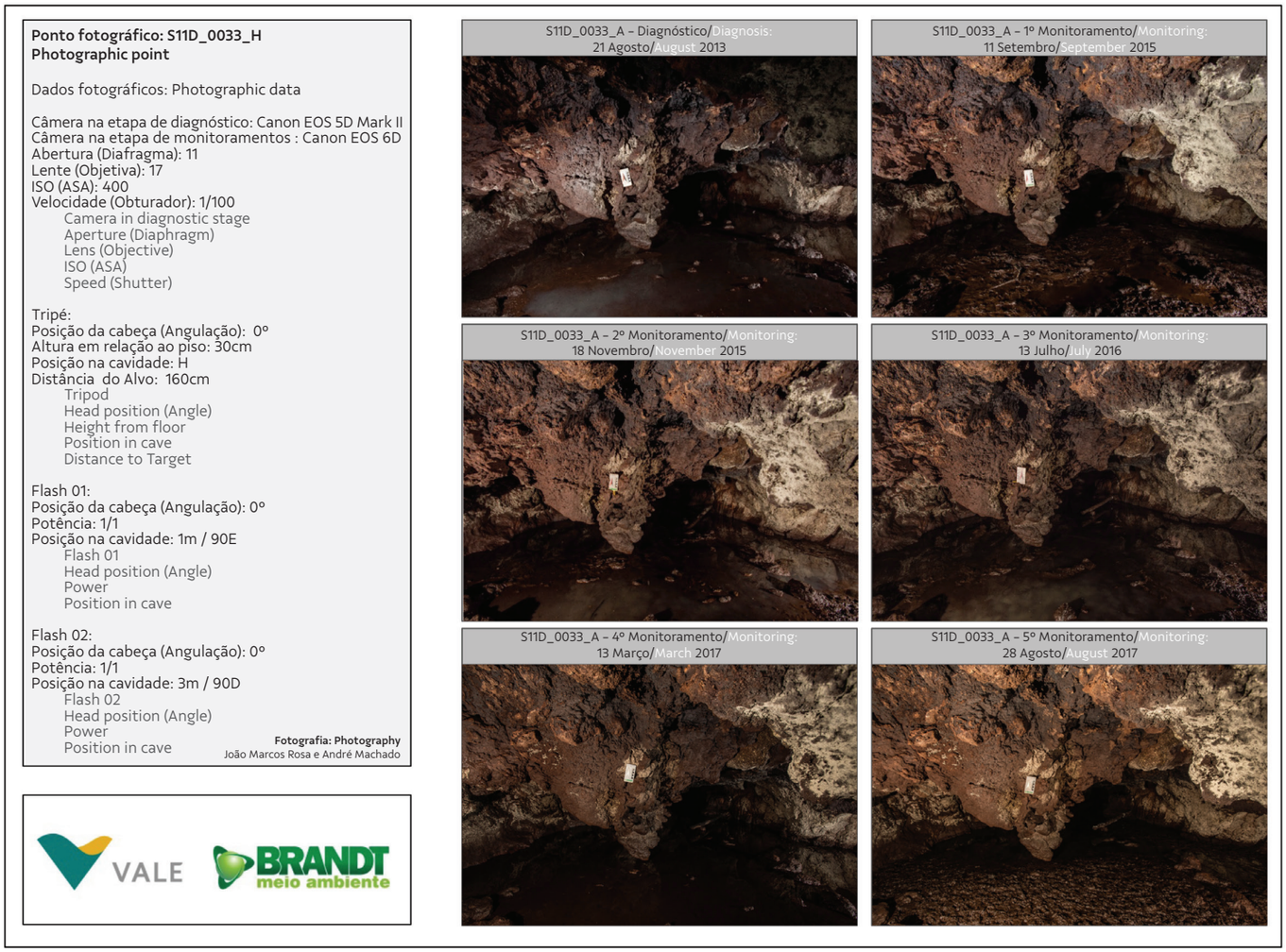


Figura 15: Exemplo de "book fotográfico" desde o diagnóstico até a 5ª campanha de monitoramento de um ponto interno (salão) da cavidade S11D–0033 em períodos de chuva e seca. Fonte: Brandt, 2017.
Figure 15: Example of "photographic book" from diagnosis to the fifth monitoring campaign of an internal point (hall) of cave S11D–0033 in rainy and dry periods. Source: Brandt (2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada para monitoramento fotográfico nas cavidades naturais subterrâneas inseridas na formação ferrífera se mostrou eficaz diante dos desafios da sua aplicabilidade. Tanto as cavernas com pequeno volume quanto as de volumes notáveis puderam ser avaliadas pela aplicação do mesmo método.

A busca incessante por uma evolução do método utilizado gerou resultados que puderam ser comprovados por meio de alterações físicas observadas nas cavidades ao longo de mais de cinco anos de monitoramento (Figura 16).

5 FINAL CONSIDERATIONS

The methodology used for photographic monitoring in caves inserted in ferriferous formations proved to be effective in the face of challenges to its applicability. Both caves with small volumes and those with notable volumes were evaluated by applying the same method.

The incessant search for an evolution of the method used generated results that demonstrated its effectiveness by documenting physical changes in the caves over more than five years of monitoring (Figure 16).



Figura 16: Painel com alterações físicas visíveis no teto da cavidade natural subterrânea. As fotos à esquerda mostram a condição original do local e à direita, a alteração identificada (seta). Fonte: Adaptado de Brandt, 2017.

Figure 16: Panel showing visible physical changes in the cave ceiling. Photos on the left show the original condition of the site, while those on the right show the identified change (arrow). Source: Adapted from Brandt (2017).

Vale mencionar ainda que alguns dos impactos observados foram oriundos do ingresso e de atividades de outros profissionais, como escavações para estudos arqueológicos, por exemplo. Além disso, processos naturais como desplacamentos e assoreamentos também podem ser observados durante a realização de um monitoramento fotográfico padronizado.

De forma geral, as técnicas aqui apresentadas para a execução de um monitoramento fotográfico de cavernas podem ser aplicadas a cavidades naturais subterrâneas hospedadas em todos os tipos de litologia, pois são capazes de gerar resultados concretos e comparáveis por meio de fotografias ao longo do tempo. Dessa forma, trata-se de um importante instrumento para a avaliação dos impactos ambientais provenientes da instalação e operação de atividades potencialmente danosas ao patrimônio espeleológico no Brasil ou em qualquer outra parte do mundo.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

Entende-se como equipamentos mínimos os que foram supracitados. Possivelmente, em breve, todas as câmeras migrarão para a tecnologia denominada *mirrorless*, cuja qualidade é igual ou superior as das câmeras convencionais, com a grande vantagem de serem mais leves, facilitando, assim, o deslocamento no campo em áreas naturais e dentro das cavidades naturais subterrâneas, resultando na redução dos riscos laborais.

Da mesma forma, o monitoramento com câmeras 360 graus já é uma realidade para cavidades naturais subterrâneas e todo o trabalho pode ser visualizado de forma *on-line* e interativa com óculos de realidade virtual.

Finalmente, a fotogrametria pode ser definida como o processo de medir e reconstruir objetos a partir de imagens tiradas de diferentes ângulos e posições. Esse método permite obter modelos detalhados e precisos das formas e dimensões das cavidades naturais subterrâneas, bem como das suas características geológicas e biológicas. Além de ser uma metodologia ainda com perspectiva de uso futuro nos programas de monitoramento, a fotogrametria é um método caro, quando comparado aos mais tradicionais. No entanto, esses modelos têm diversas aplicações, como o estudo científico do ambiente subterrâneo, a conservação do patrimônio espeleológico, o planejamento de atividades espeleológicas e turísticas e a criação de conteúdos educacionais e culturais.

It is also worth mentioning that some of the observed impacts came from the entry and activities of other professionals, such as excavations for archaeological studies, for example. Furthermore, natural processes, such as displacement and silting, can also be observed during standardized photographic monitoring.

In general, the techniques presented here for carrying out photographic monitoring of caves can be applied to caves in all types of lithologies, as they are capable of generating concrete and comparable results through photographs over time. Therefore, it is an important instrument for evaluating the environmental impacts arising from the installation and operation of activities that are potentially harmful to speleological heritage in Brazil or in any other part of the world.

6 FUTURE PERSPECTIVES

Minimum equipment is understood to be those mentioned above. Possibly, soon, all cameras will migrate to mirrorless technology, whose quality is equal to or greater than that of conventional cameras, with the great advantage of being lighter, thus facilitating movement in the field in natural areas and inside caves, resulting in a reduction of occupational risks.

Likewise, monitoring with 360-degree cameras is already a reality for caves and all work can be viewed *online* and interactively with virtual reality glasses.

Finally, photogrammetry can be defined as the process of measuring and reconstructing objects from images taken from different angles and positions. This method makes it possible to obtain detailed and precise models of the shapes and dimensions of caves, as well as their geological and biological characteristics. In addition to being a methodology that still has prospects for future use in monitoring programs, photogrammetry is expensive when compared to more traditional methods. However, these models have diverse applications, such as the scientific study of the subterranean environment, the conservation of speleological heritage, the planning of speleological and tourist activities and the creation of educational and cultural content.

7 AGRADECIMENTOS

Em especial às famílias, Patrícia e Theo, esposa e filho do André, Patrícia Zen, Luíza e Helena, esposa e filhas do Allan, por compreenderem que os longos períodos de tempo passados nos campos ferruginosos do Norte e Sudeste do Brasil nunca foram em vão e geraram novos conhecimentos que precisam ser repassados. À equipe de espeleologia da Vale, pelo apoio durante os vários anos de trabalho de monitoramento. À equipe da Brandt Meio Ambiente e Ativo Ambiental pela oportunidade de realizar os monitoramentos fotográficos. Aos amigos e colegas que colaboraram ao longo de anos de jornadas espeleológicas: Thiago Lima, Antônio Seabra, Mônica Pires, Nemis Jr. (*in memoriam*), Cleovani Santana, Gilson Marins, Reginaldo Marins, Paulo Leite, Reinaldo Bastos, Antônio Correia, Gilberto Nascimento, Sr. Antônio Lima, Sr. Raimundo Lima e Sr. Valdir Lima.

7 ACKNOWLEDGEMENTS

In especial to the families, Patrícia and Theo, André's wife and son, Patrícia Zen, Luíza e Helena, Allan's wife and daughters, for understanding that the long periods of time spent in the ferruginous fields of the North and Southeast regions of Brazil were never in vain and generated new knowledge that needs to be passed on. The Vale speleology team, for their support during the several years of monitoring work. The Brandt Meio Ambiente e Ativo Ambiental teams for the opportunity to carry out photographic monitoring. To friends and colleagues who collaborated over years of speleological journeys: Thiago Lima, Antônio Seabra, Mônica Pires, Nemis Jr. (in memoriam), Cleovani Santana, Gilson Marins, Reginaldo Marins, Paulo Leite, Reinaldo Bastos, Antônio Correia, Gilberto Nascimento, Mr. Antônio Lima, Mr. Raimundo Lima and Mr. Valdir.Lima



Figura 17: Equipe de campo na região de Serra Sul da Serra dos Carajás, Pará, Brasil, no segundo semestre de 2018, André B. Machado, Thiago Lima, Antônio Correia, Sr. Valdir, Nemis Jr. (*in memoriam*) e Paulo Leite.
Figure 17: Field team in the Serra Sul region of Serra dos Carajás, Pará, Brazil, in the second half of 2018: André B. Machado, Thiago Lima, Antônio Correia, Sr. Valdir, Nemis Jr. (in memoriam) and Paulo Leite.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ATIVO AMBIENTAL LTDA. **Monitoramento fotográfico**: Serra Norte. 66 p., 2020. Relatório.

BRANDI, R. Ricardo Krone e Lourenço Granado: influências na história da espeleologia paulista no final do século XX. **O Carste**, Belo Horizonte, v. 19, n. 2, p. 36–61, 2007.

BRANDT MEIO AMBIENTE. **Monitoramento fotográfico em cavidades naturais em S11D**. 32 p., 2017. Relatório.

BRANDT MEIO AMBIENTE. **Monitoramento fotográfico relatório anual mina Serra Norte**. 93 p., 2019. Relatório.

CARSTE. **Monitoramento fotográfico**: registro inicial Ramal Ferroviário Sudeste do Pará – RSFP. [Belo Horizonte]: 26 p., 2015. Relatório.

HILDRETH-WERKER, V. Photographs as cave management tools. *In*: HILDRETH-WERKER, V.; WERKER, J. C. (ed.). **Cave conservation and restoration**. Huntsville: National Speleological Society, 2006. p. 203–214.

HUDSON. N. W. **Field measurement of soil erosion and runoff**. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1993.

KOSSOY, B. **Realidades e ficções na trama fotográfica**. [Cotia]: Ateliê Editorial, 1999.

SETE; VALE. Relatório anual dos programas espeleológicos. *In*: **Projeto Ferro Carajás S11D**. Canaã dos Carajás: [*s. n.*], 2012. Plano Básico Ambiental. cap. 10.

SETE; VALE. Relatório anual dos programas espeleológicos. *In*: **Projeto Ferro Carajás S11D**. Canaã dos Carajás: [*s. n.*], 2014. [Atualização do] Plano Básico Ambiental. cap. 10.

VALE. Espeleologia *In*: **Estudo de Impacto Ambiental**: Ramal Ferroviário Sudeste do Pará – RFSP. 29 p., 2013. Relatório de monitoramento fotográfico inicial.

WERKER. J. C. Materials considerations for cave installations. *In*: HILDRETH-WERKER, V.; WERKER, J. C. (ed.). **Cave conservation and restoration**. Huntsville: National Speleological Society, 2006. p. 167–174.

ZOGBI, L.; CALUX, A. **Luzes na escuridão**. Volume 1. São Paulo: Estalactite Editora, 2017. 300 p.



Estação para monitoramento sismográfico remoto /
Remote seismographic monitoring station
Foto/Photo: Vekto Engenharia

Monitoramento sísmico em cavernas ferríferas

LEANDRO ALVES CALDEIRA LUZZI
LUIZ FELIPE MENDONÇA DE AMORIM
IURI VIANA BRANDI

1 INTRODUÇÃO

Ao fazermos uma reflexão sobre as cavernas localizadas em formações ferríferas, logo associamos a sua ocorrência aos depósitos naturais de minério de ferro e, consequentemente, às atividades minerárias presentes nesses locais, uma vez que este é o bem mineral metálico mais extraído no mundo, segundo dados da United States Geological Survey (2022).

No Quadrilátero Ferrífero, por exemplo, uma região de importante explotação mineral no estado de Minas Gerais, estão localizadas várias minas de minério de ferro, incluindo algumas das mais antigas do Brasil. A figura a seguir apresenta a relação desses empreendimentos com o potencial espeleológico, com base no Mapa de Potencialidade de Ocorrências de Cavernas no Brasil (CECAV, 2012).

As vibrações sísmicas induzidas são os sismos não relacionados a eventos de origem natural (vulcânica, tectônica, entre outros). Porém, de forma análoga, propagam-se pelo terreno em formas de ondas oriundas de uma liberação instantânea de energia na porção superficial do terreno. Nas atividades minerárias, as vibrações sísmicas são decorrentes, principalmente, do desmonte de rocha com a utilização de explosivos, do desmonte mecânico e do tráfego e operação de equipamentos (caminhões fora de estrada, escavadeiras, rompedores hidráulicos). Logo, a manutenção da integridade física das cavernas do entorno está diretamente relacionada aos níveis de vibração gerados por essas fontes emissoras.

Utilizado para mensurar os níveis de vibração aos quais as cavernas estão submetidas, principalmente no entorno de empreendimentos industriais, o monitoramento de vibrações tem em sua essência uma instrumentação simples, com o emprego de sismógrafos de engenharia. Contudo, sua aplicação sistemática, com sensores de boa qualidade e devidamente calibrados, é de extrema importância, uma vez que a obtenção de resultados fidedignos permitirá estabelecer métricas adequadas no que se refere a controles mitigatórios e à preservação da integridade física das cavernas.

Seismic monitoring in ferriferous caves

LEANDRO ALVES CALDEIRA LUZZI
LUIZ FELIPE MENDONÇA DE AMORIM
IURI VIANA BRANDI

1 INTRODUCTION

When reflecting on caves located in iron formations, we immediately associate their occurrence with natural deposits of iron ore and, consequently, with the mining activities present in these locations, since this is the most extracted metallic mineral asset in the world (United States Geological Survey 2022).

The Quadrilátero Ferrífero, for example, is a region of important mineral explotation in the state of Minas Gerais that contains several iron ore mines, including some of Brazil's oldest. The following figure shows the relationship between these projects and speleological potential, based on the Mapa de Potencialidade de Ocorrências de Cavernas no Brasil (CECAV, 2012).

Induced seismic vibrations are ground vibrations that are not related to events of natural origin (volcanic, tectonic and others). However, in a similar way, they propagate through the terrain in the form of waves arising from an instantaneous release of energy in a superficial portion of the terrain. During mining, seismic vibrations arise mainly from the dismantling of rock, with the use of explosives or mechanically, and equipment traffic and operation (off-road trucks, excavators, hydraulic breakers). Therefore, maintaining the physical integrity of the surrounding caves is directly related to the levels of vibration generated by these emission sources.

Employed to measure the vibration levels to which caves are subjected, mainly around industrial enterprises, vibration monitoring essentially involves simple instrumentation using engineering seismographs. However, its systematic application, with good quality and properly calibrated sensors, is extremely important, since obtaining reliable results allows the establishment of appropriate metrics regarding mitigating impacts and the preservation of the physical integrity of caves.

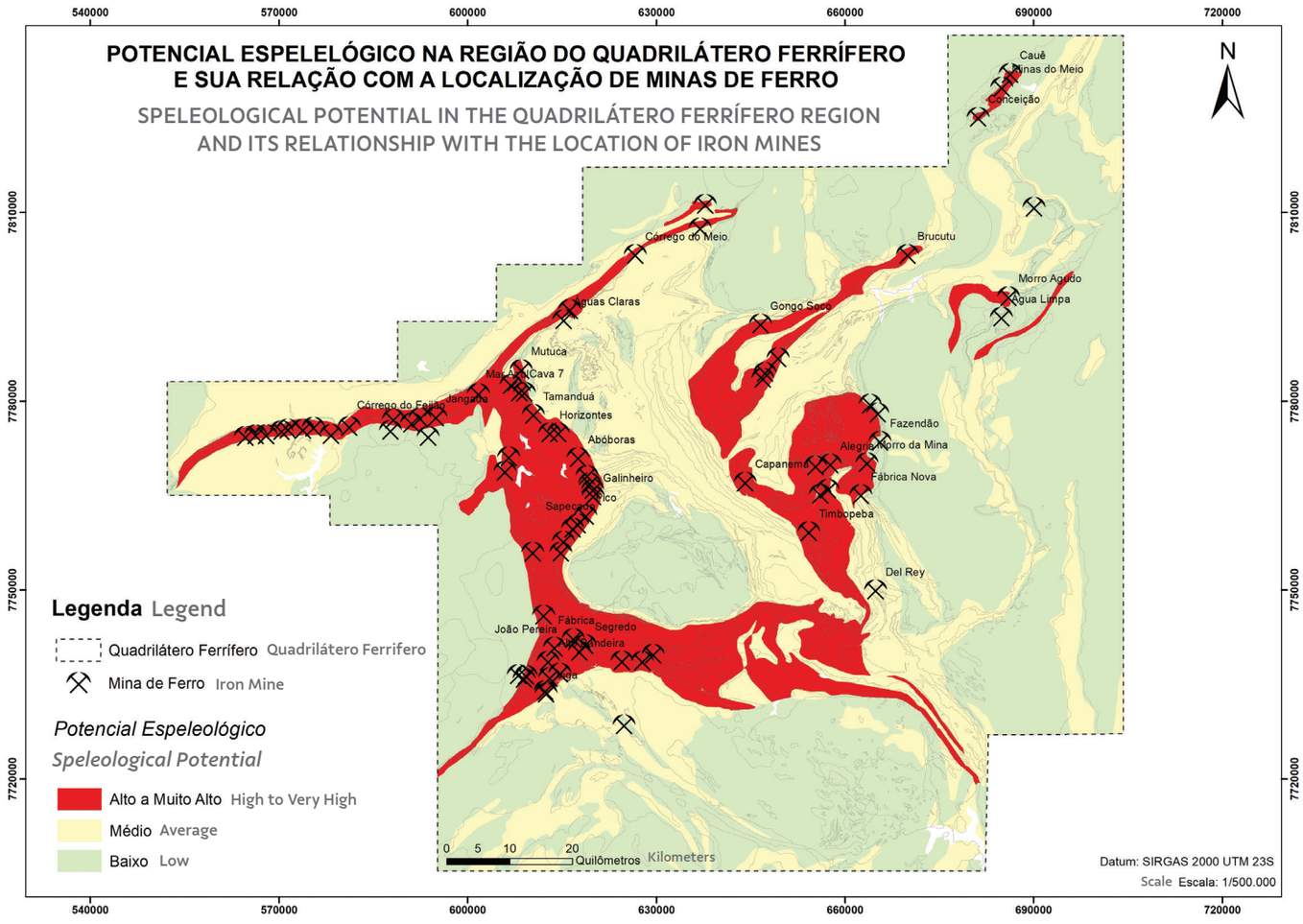


Figura 1: Potencial espeleológico regional e localização de alguns empreendimentos minerários de extração de ferro no Quadrilátero Ferrífero (estado de Minas Gerais). Fonte: Adaptado de CECAV, 2012.

Figure 1: Regional speleological potential and location of some iron mining enterprises in the Quadrilátero Ferrífero (state of Minas Gerais). Source: Adapted from CECAV, 2012.

No decorrer deste capítulo, serão apresentados alguns procedimentos considerados como boas práticas no monitoramento de vibrações sísmicas em cavernas inseridas na formação ferrífera. Serão apresentadas metodologias que permitem atender aos critérios definidos atualmente em termos de legislação, bem como atingir resultados esperados no que diz respeito ao potencial de impactos ambientais decorrentes das vibrações induzidas nas cavernas. Cabe destacar que essas práticas podem ser utilizadas no monitoramento de cavernas em qualquer litologia.

This chapter presents some procedures considered to be good practices for monitoring seismic vibrations in ferriferous caves. It also presents methodologies that make it possible to meet the criteria currently defined in terms of the laws, as well as to achieve the expected results in terms of predicting the environmental impacts resulting from induced vibrations in natural underground ferrous cavities. It is worth noting that these practices can be used to monitor caves in any lithology.

Portanto, a seguir, serão abordados tópicos relacionados à normatização, à identificação prévia dos limites de propagação das vibrações, ao controle de emissões na fonte emissora e orientações básicas para a realização de um monitoramento considerado adequado para cavernas em litologias ferríferas ou não.

2 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO DE REFERÊNCIA

Não há disponível na literatura mundial uma referência ou norma específica que estabeleça valores limites de vibração admissíveis para cavernas, seja na formação ferrífera ou em outras litologias. Contudo, por um longo período no Brasil foi utilizada como referência a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9653 intitulada "Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas", que estabelece limites de velocidade de vibração de partícula de pico (PPV) em mm/s, em função da faixa de frequência (Hz). Essa norma foi concebida para a avaliação dos efeitos físicos nas edificações, sendo elaborada pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB-018) e pela Comissão de Estudo de Desmonte de Rocha com Uso de Explosivos (CE-018:205.202). Em sua revisão de 2018, optou-se por deixar explícita a possibilidade de sua adoção como referência para o monitoramento de cavernas sem estudos específicos, ou seja, que não possuem limites reais de vibracao definidos após experimentos de campo e que consideram aspectos da paisagem como o relevo e a litologia e intrinsecos a fragilidade geotecnica da caverna.

Em 2016, com a publicação dos documentos de "Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico – Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais" e "Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais", ambos do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (CECAV/ICMBio), valores limites de velocidade de vibração de partícula de pico (PPV) têm sido adotados como critério de segurança preliminar para cavernas de *máxima relevância* com ausência de diagnóstico geológico-geotécnico específico. Portanto, partindo do princípio da precaução, são apresentados valores limites de vibração mais conservadores em relação à norma ABNT 9653, além de critérios bem definidos, considerando diferentes tipos de fontes emissoras, até que sejam realizados estudos complementares, que determinem o real critério de

Therefore, the following addresses topics related to standardization, prior identification of vibration propagation limits, control of emissions at the emission source, and monitoring guidelines considered appropriate or not for caves in iron lithologies.

2 LEGISLATION AND REFERENCE STANDARDIZATION

There is no specific reference or standard available in the world literature that establishes permissible vibration limits for caves, whether of iron or other lithologies. However, in Brazil, the standard of the Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9653 entitled "Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas" has long been used as a reference, which establishes limits of peak particle velocity (PPV) in mm/s, as a function of frequency range (Hz). This standard was designed for the assessment of the physical effects on buildings, being prepared by the Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB-018) and by the Comissão de Estudo de Desmonte de Rocha com Uso de Explosivos (CE-018:205.202). In the ABNT 9653 in 2018 review, it was decided to make explicit the possibility of its adoption as a reference for monitoring caves without specific, that do not have real vibration limits defined after field experiments and that take into account aspects of the landscape such as relief and lithology and intrinsic to the geotechnical fragility of the cave.

In 2016, with the publication of the documents "Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico – Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais" and "Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais", both from the Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (CECAV/ICMBio), limits of PPV (peak particle velocity) were adopted as preliminar safety criteria for caves of *maximum relevance* that lack specific geological-geotechnical diagnosis. Therefore, based on the precautionary principle, more conservative vibration limits are presented in relation to the ABNT 9653 standard, in addition to well-defined criteria, considering different types of emission sources, until additional

segurança para as cavernas de interesse, inseridas no contexto de um determinado empreendimento.

Considerando que cada caverna possui características físicas distintas relacionadas à sua gênese e à sua evolução, os documentos de sismografia publicados pelo CECAV apresentam orientações técnicas minimamente necessárias ao controle das vibrações induzidas, possuindo uma abordagem mais adequada à preservação de impactos sobre o patrimônio espeleológico. Importante ressaltar que as orientações contidas nesses documentos têm sido incorporadas nos ritos de licenciamento ambiental pelos órgãos licenciadores e, apesar de facultativa a sua aplicação, como uma boa prática, esse documento deve ser adotado como referência para estabelecer os limites de vibração preliminares, conforme apresentados a seguir (CECAV, 2016):

- Para atividades emissoras de vibração de caráter intermitente (detonações por explosivos, cravação de estacas etc.), recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 5,0 (cinco) mm/s como critério de segurança preliminar;
- Para atividades emissoras de vibração de caráter transiente (tráfego e operação de veículos, tráfego ferroviário etc.), recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 3,0 (três) mm/s como critério de segurança preliminar;
- Para atividades emissoras de vibração de caráter contínuo (britadores, transportadores de correia de longa distância (TCLD), maquinários pesados estacionários etc.), recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 2,5 (dois vírgula cinco) mm/s como critério de segurança preliminar.

Não obstante, os procedimentos técnicos necessários à realização dos monitoramentos (instalação dos equipamentos) devem seguir as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 9653.

3 DEFINIÇÃO DE LIMITES OPERACIONAIS

Um monitoramento de vibrações sísmicas abrangente não deve limitar-se somente à instalação dos sismógrafos, principalmente porque estes equipamentos funcionam em caráter reativo, ou seja, retornam uma resposta do evento sísmico no ponto de monitoramento, não permitindo ter a previsibilidade dos seus efeitos em toda a caverna. Diante disso, são necessárias ações complementares que permitem atuar de forma preventiva na fonte emissora, o que é alcançado através de estudos sismográficos.

studies are carried out to determine the real safety criterion for the caves of interest inserted in the context of a given project.

Considering that each cave has distinct physical characteristics related to its genesis and evolution, the seismography documents published by CECAV present minimally necessary technical guidelines for controlling induced vibrations, thereby providing a more appropriate approach to preserving impacts on speleological heritage. It is important to emphasize that the guidelines contained in these documents have been incorporated into environmental licensing rites by licensing bodies and although their application is optional, as a good practice, The CECAV document/publication must be adopted as a reference to establish preliminary vibration limits, as presented below (CECAV, 2016):

- For activities that emit intermittent vibration (e.g., explosive detonations, pile driving, etc.), a vibration level (PPV) equal to 5.0 (five) mm/s is recommended as a preliminary safety criterion;
- For activities that emit transient vibration (e.g., vehicle traffic and operation, railway traffic, etc.), a vibration level (PPV) equal to 3.0 (three) mm/s is recommended as a preliminary safety criterion;
- For activities that emit continuous vibration [e.g., crushers, long distance belt conveyor (LDBC), heavy stationary machinery, etc.], a vibration level (PPV) equal to 2.5 (two point five) mm/s is recommended as a preliminary safety criterion.

However, the technical procedures necessary to carry out monitoring (equipment installation) must follow the guidelines established by the ABNT NBR 9653 standard.

3 DEFINITION OF OPERATIONAL LIMITS

Comprehensive monitoring of seismic vibrations should not be limited to the installation of seismographs, mainly because this equipment works reactively, that is, it returns a response to a seismic event at the monitoring point and does not allow predictability of its effects throughout a cave. In view of this, complementary actions are necessary to allow preventive action on the emission source, which is achieved through seismographic studies.

Tomando-se como referência os limites de vibração preliminares, sugeridos pelo CECAV (2016), em função de cada tipo de fonte emissora e de posse da caracterização do empreendimento, é possível avaliar o potencial de impacto por vibrações nas cavernas de interesse, definindo-se a distância máxima ou o raio de propagação preliminar das vibrações geradas, o que permitirá implementar medidas de controle na fonte emissora, quando necessárias.

3.1. Fontes Mecânicas de Vibração

A definição do raio de propagação é aplicada principalmente na avaliação das fontes mecânicas de vibração, sejam elas móveis ou estáticas, como o tráfego de veículos e a operação de equipamentos. Tendo em vista que a energia dissipada por estes equipamentos é geralmente a mesma, pois está associada ao seu peso e à sua velocidade (do impacto ou tráfego), dados de referência acerca dos níveis de vibração gerados por essas fontes são comumente obtidos a partir de ensaios pontuais de monitoramentos.

Esses ensaios consistem em realizar medições partindo do ponto mais próximo possível do equipamento e avançar distanciando-se da fonte emissora, até o ponto em que não haja mais registros nos sismógrafos, definindo-se então a distância máxima de propagação das vibrações para a fonte monitorada. Um exemplo desse método para obtenção da distância máxima de propagação das vibrações é apresentado na Figura 2.

Na Figura 3 são apresentados exemplos de medições realizadas junto a diferentes tipos de veículos e equipamentos, para obtenção dos limites operacionais de propagação das vibrações.

Em relação às fontes mecânicas, as variações nos níveis de vibrações geradas podem estar associadas ao porte dos equipamentos, se estão carregados ou não, a velocidade do seu tráfego e, no caso de equipamentos fixos, ao sistema de amortecimento da sua estrutura, além das características geológicas locais. Contudo, de uma maneira geral, os registros relacionados a esse tipo de fonte emissora são relativamente baixos quando comparados ao desmonte de rocha por explosivos, tendo ainda a singularidade de se dissiparem a curtas distâncias.

Na Tabela 1, a seguir, a título de contribuição técnica, são apresentados alguns valores de vibração de estudos realizados em atividades com fontes mecânicas em litologias ferríferas. No entanto, cabe ressaltar que os valores apresentados têm caráter preliminar, uma vez que foram obtidos em condições específicas,

Taking as a reference the preliminary vibration limits suggested by CECAV (2016), depending on each type of emission source and the characterization of the project, it is possible to evaluate the potential impact of vibrations in the caves of interest by defining the maximum distance or preliminary propagation radius of the generated vibrations, which will allow implementing control measures at the emission source, when necessary.

3.1. Mechanical Sources of Vibration

The definition of propagation radius is mainly applied to the evaluation of mechanical sources of vibration, whether mobile or static, such as vehicle traffic and equipment operation. Considering that the energy dissipated by such equipment is generally the same, as it is associated with its weight and speed (from impact or traffic), reference data on the vibration levels generated by these sources are commonly obtained from specific monitoring tests.

These tests consist of carrying out measurements starting from the closest possible point to the equipment and moving further away from the emitting source to the point where there are no more records on the seismographs. The maximum propagation distance of the vibrations from the monitored source is then defined. An example of this method for obtaining the maximum vibration propagation distance is shown in Figure 2.

Figure 3 presents examples of measurements carried out for different types of vehicles and equipment, to obtain operational limits for vibration propagation.

Variation in the level of vibrations generated by mechanical sources may be associated with equipment size, whether it is loaded or not, the speed of its movement and, in the case of fixed equipment, the damping system of its structure, in addition to local geological features. However, in general, records related to this type of emission source are relatively low when compared to rock dismantling by explosives, and they also have the unique feature of dissipating over short distances.

Table 1 below provides, as a technical contribution, some vibration values from studies carried out on activities with mechanical sources in iron lithologies. It is worth noting that the presented values are preliminary in nature, as they were obtained under specific conditions, and it may be necessary

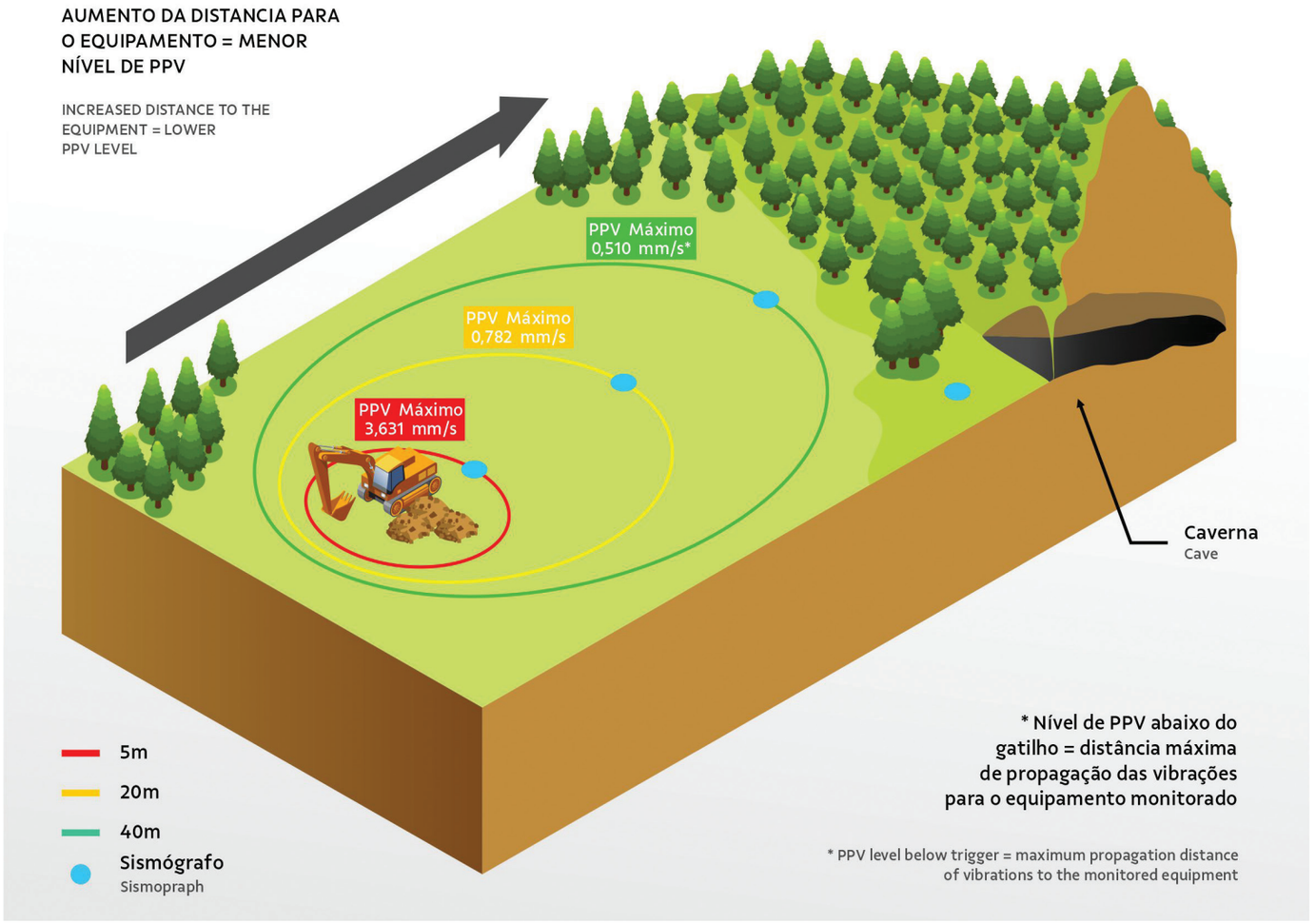


Figura 2: Desenho esquemático ilustrando o método para obtenção da distância máxima de propagação das vibrações de fontes mecânicas. Foto ao centro créditos: VMA, 2013.
Figure 2: Schematic drawing illustrating the method for obtaining the maximum propagation distance of vibrations from mechanical sources. Center photo credit VMA, 2013.

podendo ser necessária a validação dos níveis de vibração apresentados, conforme o contexto geológico do cenário alvo de monitoramento e a similaridade entre os equipamentos previstos.

A partir do conhecimento da distância máxima de propagação das vibrações é possível verificar o potencial de interferência nas cavernas de interesse que estão localizadas no entorno do empreendimento, projetando, a partir da fonte emissora ou limite da área de operação dos veículos e equipamentos, a distância máxima de propagação de vibrações

to validate the vibration levels presented, depending on the geological context of the target monitoring scenario and the similarity between the planned equipment.

Knowledge of the maximum propagation distance of vibrations allows the potential for interference to be determined for caves of interest located in project surroundings, projecting, based on the emission source or limit of the operating area of vehicles and equipment, the maximum vibration propagation distance obtained. This analysis is carried out using geoprocessing



Figura 3: Ensaios de monitoramento sismográfico realizados para determinação da distância máxima de propagação das vibrações de fontes mecânicas diversas – A) Minerador de superfície; B) Transportadores de Correia de Longa Distância (TCLD); C) Caminhão fora de estrada e D) Composição ferroviária.

Figure 3: Seismographic monitoring tests carried out to determine the maximum propagation distance of vibrations from various mechanical sources – A) surface miner; B) long distance belt conveyors (LDBCs); C) off-road truck; and D) train.

obtida. Esta análise é realizada por meio de *softwares* de geoprocessamento, utilizando ferramentas para a geração de *buffers*, permitindo, assim, definir aquelas cavernas que deverão ser alvo de monitoramento ou, até mesmo, limitar a operação de determinado equipamento no seu entorno, em função do nível de vibração esperado para uma determinada distância de sua operação. Um exemplo do resultado desse tipo de análise é apresentado na Figura 4, onde os *buffers* representam as faixas de propagação (distância) das vibrações de cada equipamento.

Neste exemplo da Figura 4, cavernas que estão fora da faixa de distância máxima de propagação das vibrações não precisariam ser monitoradas. Por outro lado, as que aparecem circunscritas pelos limites podem ser definidas como alvo de monitoramento, dependendo do nível de vibração esperado para essa faixa de distância, tempo de exposição e, principalmente, em função de alguma fragilidade geológica-geotécnica identificada no ambiente.

software and tools to generate buffers, thus allowing the determination of those caves that should be monitored, or even limit the operation of certain equipment in their surroundings, as a function of the expected vibration level for a given distance of operation. An example of the result of this type of analysis is presented in Figure 4, where the buffers represent propagation ranges (distance) of the vibrations of each type of equipment.

In the example in Figure 4, caves that are outside the maximum vibration propagation distance would not need to be monitored. On the other hand, the ones that appear circumscribed by the limits can be defined as monitoring targets, depending on the level of vibration expected for the distance, exposure time and, mainly, any identified geological-geotechnical fragility in the environment.

Tabela 1: Valores de PPV e distância máxima da influência por vibrações de alguns equipamentos durante tráfego ou operação em litologias ferríferas.

Table 1: Peak particle vibration (PPV) values and maximum distance of influence by vibrations of some equipment during traffic or operation in iron lithologies.

Fonte emissora/ Emitting source	Tipo de veículo/equipamento Type of vehicle/equipment	Distância *máxima com registro* (m) Maximum distance with recording	PPV (mm/s) PPV (mm/s)
Tráfego de veículos e operação de equipamentos Vehicle traffic and equipment operation	Motoniveladora CAT 12M CAT 12M Motor Grader	3.4	< 0.51
	Caminhões 35 toneladas Trucks 35 tons	5	< 0.51
	Caminhão fora de estrada CAT 785 CAT 785 Mining Truck	8	< 0.51
	Carregadeira CAT 993 (grande porte) CAT 993 Loader (large size)	10	0.89
	Trator de esteira D8 D8 Dozer	30	< 0.51
	Trator de esteira D6 D6 Dozer	20	0.77
	Escavadeira Liebherr 954 Liebherr 954 Excavator	27	< 0.51
	Escavadeira Liebherr 9250 Liebherr 9250 Excavator	75	< 0.51
	Perfuratriz Rock drill	10	< 0.51
	Sonda Rotativa Rotating Probe	35	0.20
	Rompedor hidráulico (martelo 2 toneladas) Hydraulic breaker (2-ton hammer)	22	0.68
	Rolo compactador CAT CP54B CAT CP54B Compactor Roller	80	< 0.51
	Moto Scraper CAT CAT Wheel Tractor-Scrapers	5	< 0.51
	Veículos leves e pesados diversos sobre pneus (via não pavimentada) Vehicles of various levels and weights on tires (via non-paved roads)	1	< 0.51
	Minerador Contínuo de Superfície T1655 Vermeer Surface Excavation Machine T1655 Vermeer	60	0.60 (mm/s)

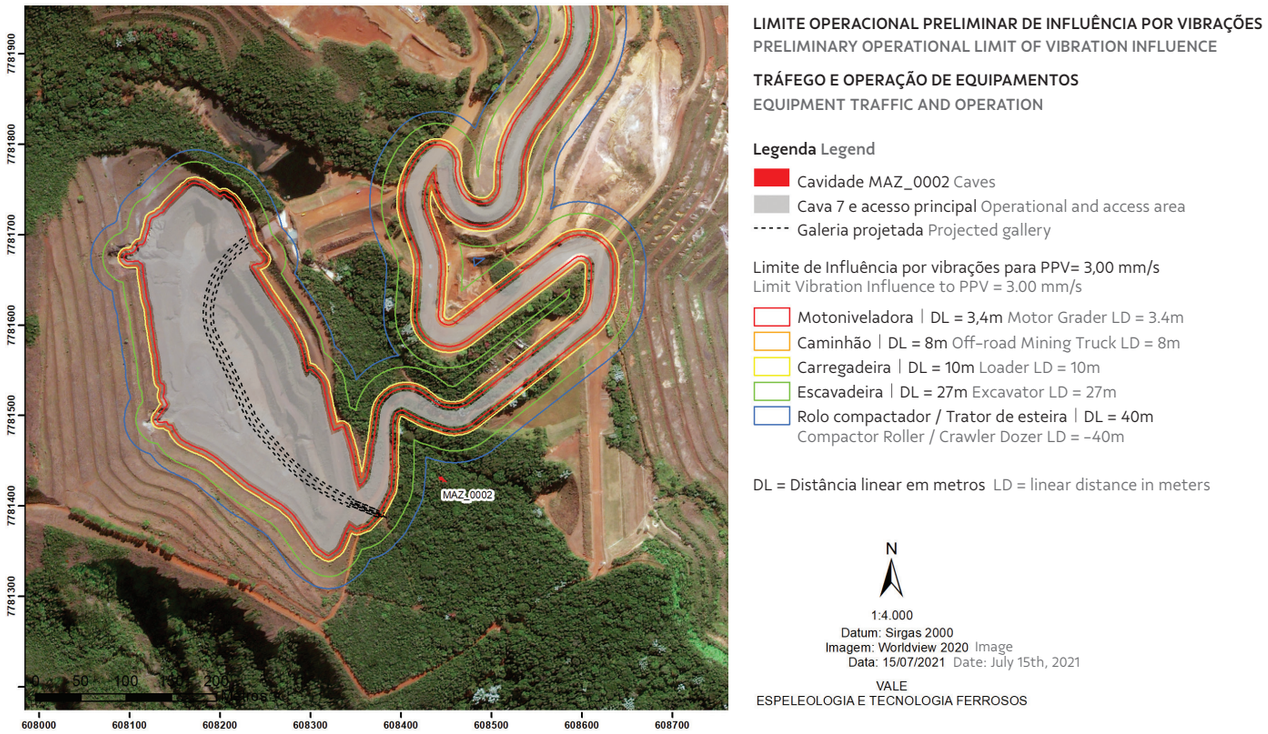


Figura 4: Definição das distâncias de influência das vibrações geradas por fontes mecânicas diversas.
Figure 4: Definition of distances of the influence of vibrations generated by different mechanical sources.

3.2. Fontes de vibração por explosivos

As vibrações geradas pelos desmontes de rocha com o uso de explosivos propagam-se por longas distâncias em função da grande quantidade de energia liberada, devido, principalmente, ao confinamento das cargas explosivas. Neste caso, o controle do nível das vibrações é possível, sobretudo, a partir da limitação da CME (carga máxima por espera de explosivos) nos desmontes a serem executados. Além disso, existem recursos técnicos associados à execução de um plano de fogo que podem minimizar os efeitos das vibrações. Como exemplo, podemos citar a amarração da malha carregada com explosivos, que permite o direcionamento da onda de choque, o uso de espoletas eletrônicas, que servem para garantir a quantidade de CME em uma detonação, a detonação de cargas em *decks*, permitindo reduzir a CME detonada em um mesmo furo, e a temporização correta dos retardos, que possibilita controlar a sobreposição de ondas e, consequentemente, maiores amplitudes nos níveis de vibração.

Tendo a limitação da CME como a principal medida no controle dos níveis de vibração, os cálculos para definir essas cargas são

3.2. Sources of vibration from explosives

Vibrations generated by rock dismantling using explosives propagate over long distances due to the large amount of energy released, mainly because of the confinement of the explosive charges. In this case, controlling the level of vibrations is possible by, above all, limiting the maximum instantaneous charge (MIC) in the dismantling to be carried out. Furthermore, there are technical resources associated with executing a fire plan that can minimize the effects of vibrations. For example, the tying of mesh loaded with explosives allows the shock wave to be directed; the use of electronic fuses serves to guarantee the amount of MIC in a detonation; the detonation of charges in *decks* allows the reduction of MIC detonated in the same hole; and the correct timing of delays makes it possible to control the overlapping of waves and, consequently, limit increased amplitudes of vibration levels.

With the limitation of MIC as the main measure to control vibration levels, the calculations to define these loads are based

realizados a partir de estudos sismográficos, os quais, geralmente, são obtidos em ensaios de desmontes padrões, que permitem uma caracterização sísmica para a região de interesse. É importante ressaltar que na impossibilidade de realizar tais ensaios *in loco*, inicialmente podem ser utilizados dados disponíveis na literatura, preferencialmente aqueles obtidos na mesma litologia.

Os ensaios para a caracterização sísmica consistem em monitorar uma ou mais detonações, com a instalação de, no mínimo, quatro ou mais sismógrafos em uma linha definida entre o local da detonação e o ponto de interesse. Na Figura 5, a seguir, é apresentado o mapa esquemático de ensaios realizados para a obtenção das equações de atenuação das vibrações.

A maioria dos modelos empíricos propostos são capazes de prever o PPV com base em dois parâmetros: carga máxima por CME e distância entre as detonações e os pontos monitorados. De acordo com Dowding (1985), a velocidade de partícula pode ser estimada de duas maneiras: relação de atenuação e relação de escalonamento. A relação de atenuação descreve o decaimento da velocidade de pico com o aumento da distância da fonte de energia, enquanto a relação de escalonamento descreve este

on seismographic studies. Such studies generally obtain data from standard blast tests, which allow a seismic characterization for the region of interest. It is important to emphasize that if such tests cannot be performed *in loco*, data available in the literature, preferably those obtained from the same lithology, can be used initially.

Tests for seismic characterization consist of monitoring one or more detonations, with the installation of at least four or more seismographs on a defined line between the location of the detonation and the point of interest. Figure 5 below presents a schematic map of tests carried out to obtain vibration attenuation equations.

Most of the proposed empirical models can predict PPV based on two parameters: maximum instantaneous charge (MIC) and distance between detonations and monitored points. According to Dowding (1985), particle velocity can be estimated in two ways – by attenuation relationship and by scaling relationship. The attenuation relationship describes the decay of peak velocity with increasing distance from the energy source, while

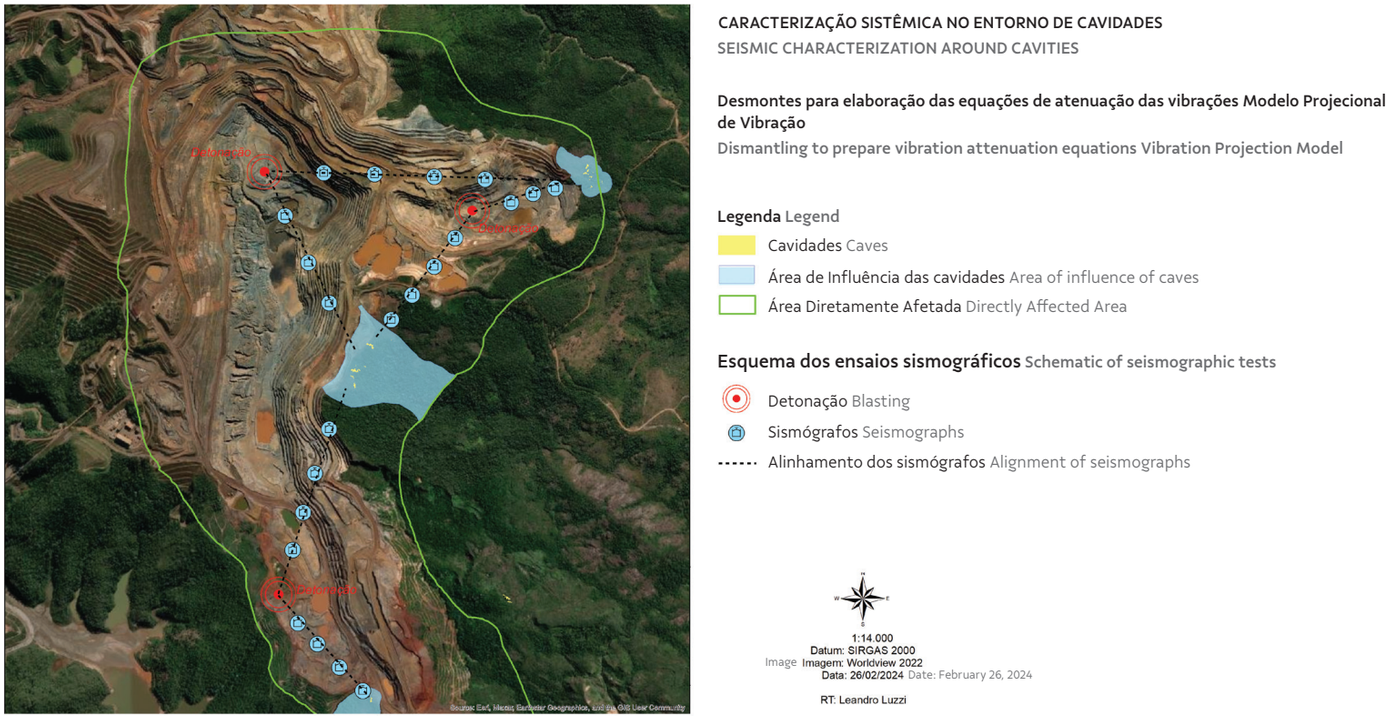


Figura 5: Mapa esquemático dos ensaios para caracterização sísmica no entorno de cavernas.
Figure 5: Schematic map of tests for seismic characterization around caves.

decaimento com a distância de forma normalizada pela fonte de energia.

A relação de escalonamento é a mais utilizada para situações em que, a uma mesma distância do ponto de controle, a fonte de energia é variável, como no caso das detonações em maciços rochosos. Na prática, a "Lei de Atenuação da Vibração dos Terrenos" relaciona a velocidade de partícula com a distância do ponto de detonação e a CME, sendo expressa pela equação:

$$V = k\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-m}$$

Onde:

V = Velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s)

D = Distância entre o ponto de medição e o ponto de detonação (m)

Q = Carga máxima de explosivo detonada por espera (kg)

k e m = variáveis em função dos parâmetros de fogo e das características do terreno.

A relação da distância sobre a raiz da carga é chamada distância escalonada. Na construção dos modelos matemáticos de previsão das vibrações considera-se que os dados de vibração seguem uma distribuição "log normal", sendo o tratamento matemático aplicado na linearização dos dados e obtenção dos coeficientes "k" e "m" é realizado com "logaritmo de base 10".

A partir do monitoramento de detonações e da medição de valores de velocidade de vibração de partícula para distâncias escalonadas conhecidas, os fatores "k" e "m" são obtidos através da regressão linear da reta representativa da "Lei de Atenuação da Vibração dos Terrenos".

Com os valores estabelecidos, pode-se traçar um gráfico relacionando a CME e a distância em relação à cavernas, para que haja um controle dos níveis de vibração no ponto de interesse ou monitoramento.

Após a concepção do modelo projecional preliminar de vibrações, são propostas as CME's de explosivos para os avanços de lavra no entorno das cavernas, com o objetivo de que as vibrações no ponto de interesse não superem o limite adotado.

Na Figura 6, a seguir, é apresentado um exemplo de mapeamento das CME's no entorno de um conjunto de cavernas localizadas próximo a um empreendimento de mineração de ferro, elaborado com base em resultados obtidos de ensaios de caminhamento sismográfico para a caracterização sísmica local.

the scaling relationship describes this decay with distance in a way normalized by the energy source.

The scaling relationship is used most for situations in which, at the same distance from the control point, the energy source is variable, as in the case of detonations in rock masses. In practice, the "Ground Vibration Attenuation Law" relates particle velocity to distance from the detonation point and the MIC, as expressed by the equation:

$$V = k\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-m}$$

Where:

V = Peak particle velocity (mm/s)

D = Distance between the measuring point and the detonation point (m)

Q = Maximum instantaneous charge detonated per hold (kg)

k and m = variables depending on fire parameters and terrain characteristics, respectively.

The relationship of distance over the root of the load is called scaled distance. When constructing mathematical models for predicting vibrations, vibration data is considered to follow a "log normal" distribution. The mathematical treatment applied to the linearization of data and obtaining the coefficients "k" and "m" is carried out with a "base 10 logarithm".

From the monitoring of detonations and the measurement of PPV values for known scaled distances, the factors "k" and "m" are obtained through linear regression of the straight line representing the "Ground Vibration Attenuation Law".

With the values established, a graph can be drawn relating the MIC and distance in relation to the cave, so that vibration levels can be controlled at the point of monitoring.

After designing the preliminary projectional vibration model, values for the MIC of explosives for mining advances around caves are proposed, with the objective that vibrations at the point of interest do not exceed the adopted limit.

Figure 6 below presents an example of mapping the MIC values around a set of caves located close to an iron mining enterprise, based on results obtained from walking seismographic tests for local seismic characterization.

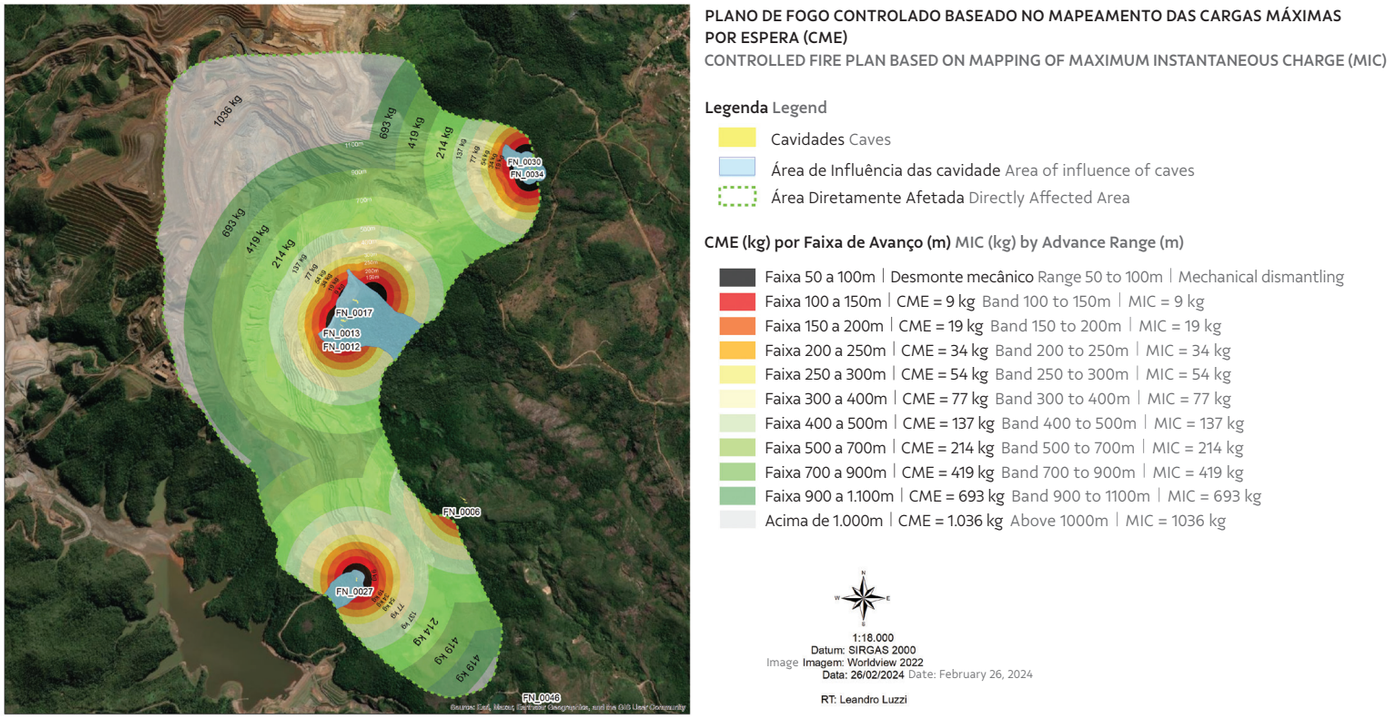


Figura 6: Exemplo de mapeamento do montante das cargas máximas por espera (CME) para o controle do nível de vibrações em relação ao patrimônio espeleológico local.
Figure 6: Example of mapping the maximum instantaneous charge (MIC) to control the level of vibrations in relation to local speleological heritage.

Cabe ressaltar que devido às características geológicas do meio, podem ocorrer tanto a atenuação quanto o incremento do nível das vibrações. Portanto, o modelo projecional deve ser continuamente retroalimentado pelos registros obtidos no monitoramento local com o objetivo de refinar a equação de atenuação das vibrações e permitir a readequação das cargas inicialmente propostas.

4 EXECUÇÃO DO MONITORAMENTO

A Sismografia, através do registro do movimento ondulatório, permite mensurar a intensidade das vibrações, as quais, dependendo do seu nível, podem causar danos às estruturas adjacentes, como as edificações e à paisagem natural, que inclui o patrimônio espeleológico. Esse registro é realizado por um sismógrafo de engenharia (Figura 7), responsável por converter os sinais obtidos por um geofone eletromagnético em grandezas mensuráveis, que são reportadas por meio de um relatório conhecido como sismograma.

It is worth noting that due to the geological characteristics of the environment, both attenuation and an increase in vibration level can occur. Therefore, the projection model must continuously is updated from records obtained during local monitoring with the aim of refining the vibration attenuation equation and allowing the readjustment of the initially proposed loads.

4 EXECUTION OF MONITORING

Seismography, through the recording of wave movement, allows the intensity of vibrations to be measured, which, depending on the level, can cause damage to adjacent structures, such as buildings and the natural landscape, which includes speleological heritage. This recording is carried out by an engineering seismograph (Figure 7), responsible for converting the signals obtained by an electromagnetic geophone into measurable quantities, which are reported as a seismogram.

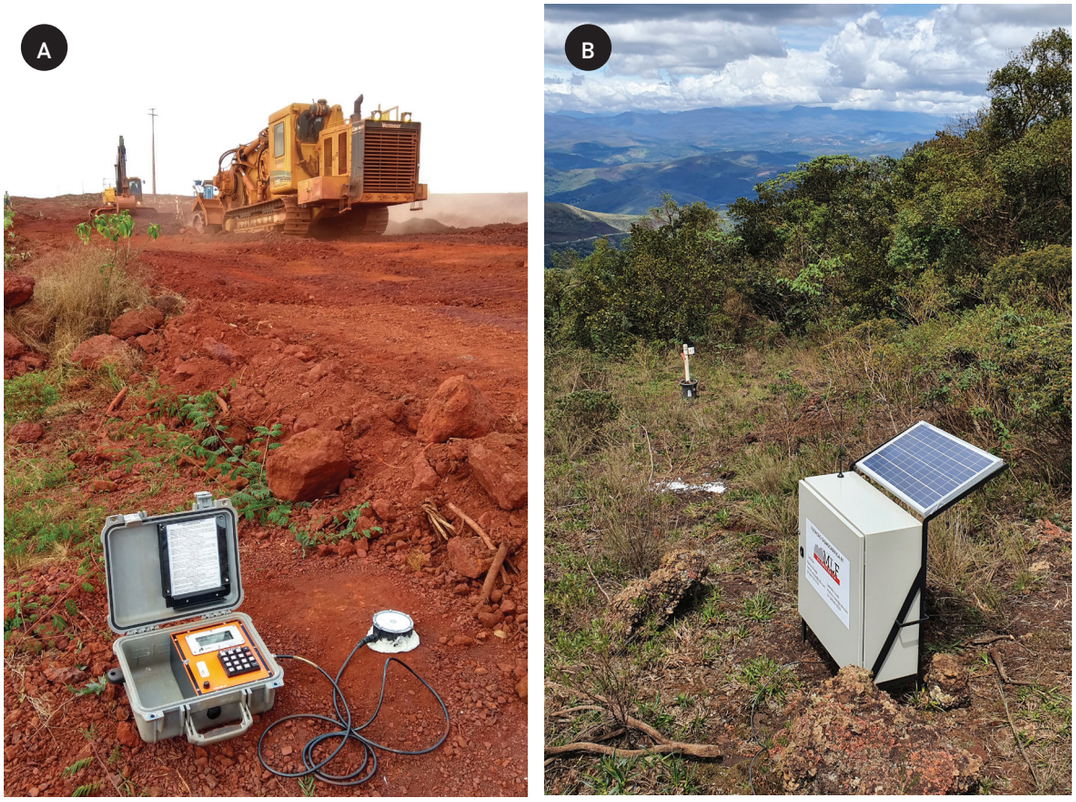


Figura 7: A) Sismógrafo utilizado durante o monitoramento da operação de equipamentos; B) Estação autônoma com sismógrafo para o monitoramento de cavernas.
Figure 7: A) Seismograph during the monitoring of equipment operation. B) Autonomous station with seismograph for monitoring caves.

O geofone eletromagnético é constituído por um sistema massa-mola, onde uma bobina móvel é suspensa por molas em torno de um núcleo magnético fixo à estrutura (Holden, 2014). O seu funcionamento baseia-se na indução eletromagnética de acordo com a lei de Faraday-Neumann-Lenz, onde o deslocamento do imã em relação à massa de prova (bobina) induz uma corrente elétrica, sendo esta diretamente proporcional à velocidade de oscilação da bobina. Deste modo, a tensão elétrica (Volts) presente nos terminais de um geofone é igual ao produto da sensibilidade pela velocidade de oscilação da massa de prova (bobina). Por sua vez, a sensibilidade é governada pelo número de espiras da bobina e pela força do campo magnético do imã. Já a frequência de resposta é dada em função das constantes elásticas das molas e da massa da bobina (Hons, 2008). A Figura 8 apresenta um exemplo de transdutor de um geofone do sismógrafo de engenharia.

An electromagnetic geophone is made up of a mass-spring system with a moving coil suspended by springs around a magnetic core fixed to the structure (Holden, 2014). Its operation is based on electromagnetic induction in accordance with the Faraday-Neumann-Lenz Law, whereby the displacement of the magnet in relation to the test mass (coil) induces an electric current, which is directly proportional to the oscillation speed of the coil. Therefore, the electrical voltage (Volts) present at the terminals of a geophone is equal to the product of the sensitivity and the oscillation speed of the test mass (coil). In turn, sensitivity is governed by the number of turns in the coil and the strength of the magnet's magnetic field. The response frequency is given as a function of the elastic constants of the springs and the mass of the coil (Hons, 2008). Figure 8 presents an example of a geophone transducer of an engineering seismograph.

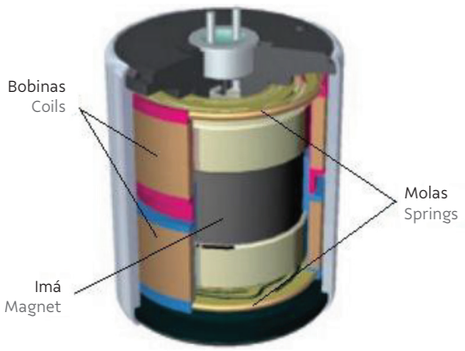


Figura 8: Transdutor de um geofone do Sismógrafo de Engenharia. Fonte: Koc, 2013.
Figure 8: Geophone transducer of an engineering seismograph. Source: Koc, 2013.

Os sismógrafos de engenharia mais atuais apresentam, inicialmente, os resultados em um display que mostra a máxima velocidade de vibração de partícula registrada em cada canal (transversal, vertical e longitudinal) – PPV. Através da comunicação com microcomputadores e *software* específico, obtém-se os valores máximos de deslocamento e aceleração de partícula em cada direção.

Para o item de velocidade de vibração de partícula, calcula-se ainda, para cada máximo, a frequência (em hertz) medida de zero a pico e o instante de ocorrência (em milissegundos) a partir do início de seu acionamento. Obtém-se, ainda, a resultante vetorial da velocidade de vibração de partícula (PVS) analisada em incrementos de tempo de um milissegundo e apresentando o valor máximo em todo o evento, bem como seu instante de ocorrência.

Atualmente existem diversas marcas e modelos de sismógrafo de engenharia, amplamente utilizados para o monitoramento de cavernas, com calibração em laboratórios reconhecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) no Brasil. Além de ser uma exigência normatizada pela ABNT 9653, utilizar um equipamento que esteja devidamente calibrado é pré-requisito para realizar um monitoramento com acurácia adequada.

Uma boa prática nesse contexto é verificar no certificado emitido se a calibração dos sensores encontra-se dentro das faixas de tolerância, sendo de extrema importância que o instrumentista saiba identificar essa deriva e, se necessário, enviar o equipamento ao fabricante para ajuste. Na Figura 9 abaixo, no gráfico (A) é possível observar um sensor não adequado ao monitoramento, já em (B) é apresentado um resultado de calibração adequado.

The most current engineering seismographs initially present the results on a display that shows the maximum PPV recorded in each channel (transverse, vertical and longitudinal). Through communication with microcomputers and specific *software*, the maximum particle displacement and acceleration values are obtained in each direction.

For the PPV item, the frequency (in hertz), measured from zero to peak, and the instant of occurrence (in milliseconds), from the beginning of its activation, are also calculated for each maximum. The resultant vector of PPV is also obtained, analyzed in time increments of one millisecond and presenting the maximum value throughout the event, as well as its instant of occurrence.

Currently, there are several brands and models of engineering seismographs widely used for monitoring caves, with calibration in laboratories recognized by the Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) in Brazil. In addition to being a requirement standardized by ABNT 9653, using equipment that is properly calibrated is a prerequisite for carrying out monitoring with adequate accuracy.

A good practice in this context is to check the issued certificate to determine whether the calibration of the sensors is within tolerance ranges. It is extremely important that the instrumentalist knows how to identify this deviation and, if necessary, send the equipment to the manufacturer for adjustment. Figure 9 (A) below shows a sensor that is unsuitable for monitoring, whereas Figure 9 (B) presents an adequate calibration result.

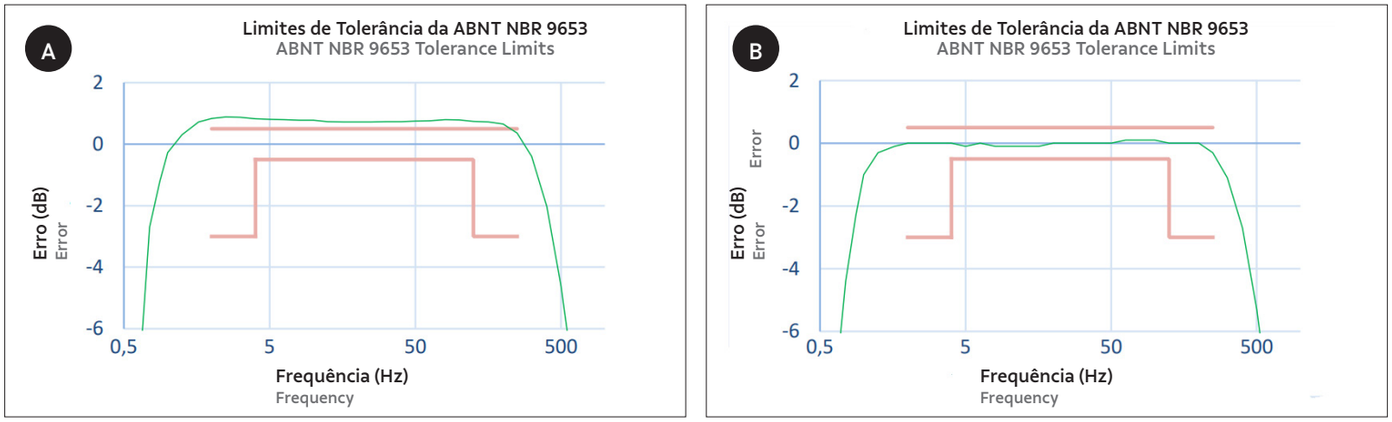


Figura 9: Exemplo de gráficos de tolerância para calibração de geofone: A) sensor descalibrado; B) sensor calibrado.
Figure 9: Example of tolerance charts for geophone calibration: A) sensor out of calibration and B) calibrated sensor.

Ainda com relação aos sismógrafos, nem todos possuem as mesmas funções, sendo recomendado utilizar equipamentos que emitam um *log* de monitoramento. O arquivo *log* é um relatório simples emitido e exportado pelo sismógrafo, que evidencia o dia em que o monitoramento foi iniciado e finalizado, o nível de gatilho utilizado, além do modo de interrupção, apontando se foi por ação do instrumentista, por ação programada ou se por esgotamento da bateria, por exemplo. Logo, por ser um arquivo rastreável, é dispensável o uso de anotações em cadernetas ou em relatório de visitas, conferindo maior credibilidade ao monitoramento realizado.

4.1 Definição do ponto de monitoramento

A definição do ponto de monitoramento na caverna foi um tema bastante controverso no passado. Recentemente, foram realizados estudos que nos permitem ter segurança para orientar o ambiente externo adjacente à caverna como o melhor ponto para instalação dos sismógrafos. A instalação nesse local permite obter resultados representativos e, principalmente, eliminar os impactos ambientais (pisoteamento do solo e substratos orgânicos, perturbação da fauna) e os riscos de saúde e de segurança associados à incursão de diferentes profissionais ao interior das cavernas.

Segundo resultados obtidos por Amorim *et al*. (2016), a posição do geofone no interior da ccaverna ou no ambiente de superfície não influencia diretamente no valor de vibração recebida, e as variações observadas no nível da velocidade de partícula (vibração) estão relacionadas, principalmente, a variáveis litológicas, à estrutura da feição e sua localização no

Not all seismographs have the same functions, and equipment that emits a monitoring *log* is recommended. A *log* file is a simple report issued and exported by the seismograph, which highlights the day on which monitoring was started and ended, and the trigger level used, in addition to the interruption mode, indicating whether it was due to the instrumentalist's action, a programmed action or if due to battery exhaustion, for example. As it is a records file, it is unnecessary to use notes in notebooks or in visit reports to give greater credibility to the monitoring carried out.

4.1 Defining the monitoring point

Defining the monitoring point in a cave has been a very controversial topic in the past. Studies were recently carried out that make it possible to confidently define the external environment adjacent to a cave as the best point for installing seismographs. Installation in this location allows representative results to be obtained while, mainly, eliminating environmental impacts (trampling of soil and organic substrates, disturbance of fauna) and health and safety risks associated with the incursion of different professionals into caves.

According to results obtained by Amorim et al. (2016), the position of the geophone inside a cave or in the surface environment does not directly influence the value of the vibrations received, and the variation observed in particle velocity (vibration) level are mainly related to lithological

perfil geomorfológico, remetendo a uma resposta específica do ponto de monitoramento. Ainda, segundo Pereira (2018), em decorrência das dimensões reduzidas das cavernas ferríferas, a alocação do sismógrafo no seu interior ou exterior, não interfere significativamente nos níveis de vibração aferidos.

Em função da característica de espalhamento esférico das ondas sísmicas, é esperado que a vibração alcance a caverna primeiramente na sua extremidade com menor distância em relação à fonte emissora. Portanto, é recomendado que o sismógrafo seja instalado nesse local, preferencialmente na superfície do terreno, com o objetivo de controlar o nível de vibração no ponto imediatamente anterior à caverna. Essas diretrizes estão em conformidade com as orientações contidas nos documentos de referência do CECAV para a realização do monitoramento sismográfico. Na Figura 10, a seguir, é apresentado um desenho esquemático para o posicionamento adequado dos sismógrafos de engenharia para o monitoramento de cavernas no entorno de uma mineração a céu aberto.

No caso do monitoramento de um agrupamento de cavernas, recomenda-se seguir a orientação descrita anteriormente, sendo definida a caverna com menor distância linear em relação à fonte emissora de vibrações, como alvo de monitoramento, dispendendo maior atenção à caverna que apresenta alguma fragilidade geotécnica. A seleção da caverna com menor distância se deve à relação de atenuação, que descreve o decaimento do nível de vibração em função do aumento de distância para a fonte emissora. Portanto, é esperado que as cavernas localizadas em posição posterior a essa no agrupamento recebam níveis menores de vibração.

Uma questão importante em relação ao ponto de monitoramento, é sempre avaliar a possibilidade de incêndios no local na época de seca, tendo em vista o elevado custo desses equipamentos.

4.2 Fixação do sensor (geofone)

Após a definição do ponto de monitoramento, é recomendado que o geofone seja instalado com a utilização de gesso quando em superfície rochosa, preferencialmente sobre o maciço ou afloramentos, conforme mencionado anteriormente. Um estudo realizado por Goulart (2004) demonstrou que a deriva na medição das vibrações é menor quando se utiliza tal material. Além disso, o gesso permite uma instalação rápida, de baixo custo, de reduzido impacto e de fácil adesão com à superfície (Figura 11). Sacos de areia e blocos de rocha sobre o geofone não são recomendados.

variables, to the structure of the feature, and to its location in the geomorphological profile, referring to a specific response from the monitoring point. Furthermore, according to Pereira (2018), due to the reduced dimensions of ferriferous caves, the placement of a seismometer inside or outside does not significantly interfere with the vibration levels measured.

Due to the spherical scattering characteristic of seismic waves, vibration is expected to first reach a cave at its end that is closest to the emission source. Therefore, it is recommended that the seismograph be installed in this location, preferably on the surface of the ground, with the aim of controlling the vibration level exactly at the point before the cave. These guidelines are in accordance with the guidelines contained in CECAV reference documents for carrying out seismographic monitoring. Figure 10 below presents a schematic drawing for the appropriate positioning of engineering seismographs for monitoring caves around open pit mining.

The guidance described previously is also recommended for cases of monitoring groups of caves, with the cave having the shortest linear distance in to the source of vibrations being defined as the monitoring target, and paying greater attention to any cave that presents some geotechnical fragility. The selection of the cave with the shortest distance is due to the attenuation relationship, which describes the decay of the vibration level as a function of increased in distance from the emission source. Therefore, it is expected that caves located further in the grouping will receive lower levels of vibration.

An important issue in relation to the monitoring point is always to assess the possibility of fires at the site during the dry season, given the high cost of this equipment.

4.2 Sensor (geophone) attachment

Once the monitoring point is defined, the geophone should be installed using plaster when on a rocky surface, preferably on the massif or outcrops, as mentioned previously. Goulart (2004) demonstrated that the deviation in measuring vibrations is smaller when using such material. Furthermore, plaster allows for quick, low-cost, low-impact installation and easy adhesion to the surface (Figure 11). Sandbags and rock blocks over the geophone are not recommended.

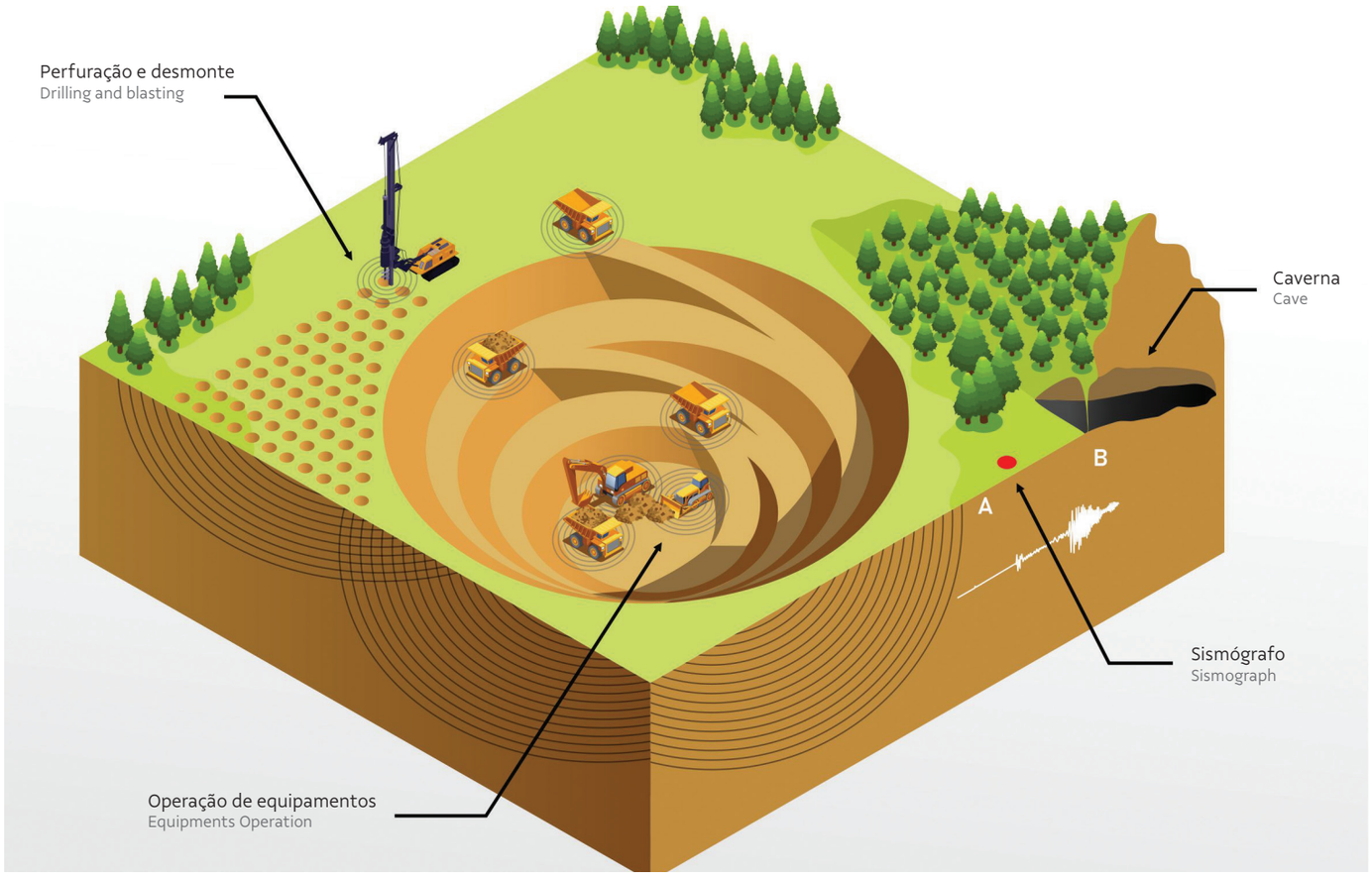


Figura 10: Posicionamento ideal do sismógrafo (ponto A) em uma frente de lavra, em relação à caverna (ponto B).
Figure 10: Ideal positioning of a seismograph (point A) on a mining front, in relation to the cave (point B).

No caso de a fixação ser realizada diretamente no solo, é recomendada a retirada do material superficial e cravação do geofone através de acessórios conhecidos como *spikes* (Figura 12). A profundidade de fixação do geofone deve ser de, no mínimo, 10 cm e não superior a 30 cm, conforme orientações da norma ABNT 9653, sendo opcional o cobrimento do geofone com solo.

If fixation is done directly into the ground, surface material should be removed, and the geophone anchored using accessories known as spikes (Figure 12). The geophone must be fixed at a depth of at least 10 cm and no more than 30 cm, in accordance with the guidelines of standard ABNT 9653, covering the geophone with soil being optional.

4.3 Configuração do sismógrafo de engenharia

De uma maneira geral, os três tipos de fontes emissoras de vibração para os quais foram atribuídos limites preliminares pelo CECAV remetem a cenários habituais no entorno das cavernas inseridas na formação ferrífera. A identificação desse cenário e o entendimento do propósito do monitoramento determinarão as configurações mais adequadas do sismógrafo de engenharia.

4.3 Configuring the engineering seismograph

In general, the three types of vibration-emitting sources for which preliminary limits were assigned by CECAV refer to common scenarios around caves inserted in iron formations. Identifying this scenario and understanding the purpose of monitoring will determine the most appropriate settings for an engineering seismometer.

No caso do monitoramento de vibrações provenientes dos desmontes de rocha com o uso de explosivos, em função das características da onda gerada, deve-se adotar como referência o limite preliminar de 5,0 mm/s. Para este tipo de fonte emissora é recomendado utilizar o modo de gravação *Waveform,* com, no mínimo, 4 segundos. Este tempo é suficiente para capturar o pico de amplitude da onda proveniente de uma detonação.

O *trigger* do geofone ou gatilho de disparo mínimo poderia ser ajustado em 5,0 mm/s por ser considerado o nível de interesse para controle de vibrações oriundas das detonações, porém, como boa prática, é recomendado que esse gatilho seja ajustado em um nível inferior, podendo ser utilizado como padrão 0,5 mm/s, que é o menor nível de gatilho de alguns sismógrafos mais antigos. Este nível de gatilho é suficientemente mínimo para excluir os registros devido à atividade humana durante a instalação do equipamento e contemplará um intervalo de interesse para a construção dos modelos matemáticos de atenuação das vibrações.

Para o monitoramento de vibração de fontes mecânicas, como nos casos de tráfego de veículos e de operação de equipamentos móveis ou estacionários, deverão ser adotados os limites de referência de 3,0 mm/s e 2,5 mm/s, respectivamente. Nos casos em que seja necessário monitorar a caverna em função de uma atividade local. Neste caso, é recomendada a configuração dos sismógrafos com gatilho mínimo disponível, podendo variar o modo de gravação entre *Waveform* ou *Histogram,* sendo este último recomendado para os casos de equipamentos

In the case of monitoring vibrations arising from rock blasting using explosives, and depending on the characteristics of the wave generated, the preliminary limit of 5.0 mm/s should be adopted as a reference. The *Waveform* recording mode is recommended for this type of emission source, with at least 4 seconds, as this amount of time is sufficient to capture the peak amplitude of the wave arising from a detonation.

The geophone *trigger* or minimum trigger firing could be adjusted to 5.0 mm/s, as this is considered the level of interest for controlling vibrations arising from detonations. However, as good practice, it is recommended that this trigger be adjusted to a lower level, and 0.5 mm/s can be used as a standard, which is the lowest trigger level of some older seismographs. This trigger level is sufficiently minimal to exclude records due to human activity during equipment installation and will cover the range of interest for the construction of mathematical vibration attenuation models.

For monitoring vibration from mechanical sources, such as vehicle traffic and the operation of mobile or stationary equipment, reference limits of 3.0 mm/s and 2.5 mm/s, respectively, must be adopted. In cases in which it is necessary to monitor the cave due to a local activity is recommended to configure the seismographs with the minimum trigger available, and the recording mode can vary between Waveform or Histogram, the latter being recommended for cases of stationary equipment or those for which the time between



Figura 11: A) Fixação do geofone com gesso e B) geofone instalado. **Figure 11**: A) Fixing the geophone with plaster and B) an installed geophone.



Figura 12: A) Fixação do geofone com "spikes" e B) geofone instalado a 10 cm de profundidade.
Figure 12: A) Fixing the geophone with spikes and B) geophone installed at a depth of 10 cm.

estacionários ou aqueles em que o tempo de um evento e outro é superior ao de abertura do gatilho no modo *Waveform*.

Para todos os casos de monitoramento é aconselhável que utilizem sismógrafos com uma taxa de amostragem ("sample rate") mínima de 1024. Quanto maior a taxa de amostragem, melhor será a resolução ao reproduzir a forma de onda e mais fidedignos os picos de PPV registrados. Essa taxa de amostragem recomendada deve ser quatro vezes maior que a frequência mais alta a ser registrada e está relacionada ao tipo de geofone utilizado. Portanto, sendo o geofone do padrão ISEE (1 a 250 Hz) a taxa de 1024 atende adequadamente.

5 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Quando temos uma caverna que será objeto de monitoramento ao longo da implantação e da operação de um empreendimento, a gestão e a análise contínuas dos dados do monitoramento sísmico permitirá avaliar o desempenho dos controles mitigatórios implantados. Além disso, a avaliação dos resultados correlacionada com outros programas de monitoramento, como o geoestrutural e o fotográfico, permitirá concluir se os registros obtidos estão condizentes com níveis aceitáveis de vibração em uma caverna, de forma que estes não causem danos à sua estrutura.

Uma boa maneira de realizar essa análise é através do acompanhamento estatístico dos resultados, com limites alvos

one event and another is longer than that of trigger opening in *Waveform* mode.

For all monitoring cases, it is advisable to use seismographs with a minimum sample rate of 1024. The higher the sampling rate, the better the resolution when reproducing the waveform and the more reliable the registered PPV values. This recommended sampling rate must be four times greater than the highest frequency to be recorded and is related to the type of geophone used. Therefore, as the geophone is of the ISEE standard (1 to 250 Hz), the rate of 1024 is adequate.

5 DATA ANALYSIS AND TREATMENT

When a cave is to be monitored throughout the implementation and operation of a project, the continuous management and analysis of seismic monitoring data will allow the performance of the implemented mitigation controls to be evaluated. Furthermore, evaluation of the results correlated with other monitoring programs, such as geostructural and photographic, will allow a conclusion to be made as to whether the records obtained are consistent with acceptable levels of vibration in a cave, so that they do not cause damage to its structure.

A good way to carry out this analysis is through statistical monitoring of the results, with well-defined target limits and

bem definidos e ações previamente mapeadas que possam ser iniciadas imediatamente após identificados os registros superiores aos pré-determinados, como por exemplo, uma nova avaliação geoestrutural da caverna. Na Figura 13, a seguir, é apresentado um gráfico de acompanhamento anual do monitoramento sismográfico em uma caverna ferrífera, onde podemos visualizar as principais variáveis relacionadas ao controle sismográfico de desmontes por explosivos.

Na gestão dos dados, é de extrema importância a obtenção das CME's utilizadas, coordenadas e, se possível, o polígono do desmonte para melhor correlação entre a sua distância e o ponto de monitoramento. Essas informações podem ser utilizadas para retroalimentar o modelo projecional e refinar a equação de atenuação, permitindo o ajuste adequado das cargas. Além disso, o geoprocessamento desses dados permite conhecer o comportamento sísmico de uma determinada região, identificando locais onde ocorre atenuação ou incremento nos níveis de vibração.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento sismográfico contribui significativamente para a previsibilidade de impactos em cavernas. Entretanto, os sismógrafos de engenharia comumente utilizados, são reativos a um estímulo na superfície e limitados a uma resposta sísmica pontual. Portanto, esse monitoramento deve ser associado a demais programas, como por exemplo, o geoestrutural e fotográfico para melhor efetividade e controle de possíveis alterações nas cavernas.

De forma complementar, são necessárias ações que atuem diretamente nas fontes emissoras, visando o controle prévio do nível das vibrações induzidas. Consequentemente, isso irá minimizar os efeitos das vibrações nas cavernas de interesse.

Portanto, de uma maneira geral, as boas práticas no monitoramento sísmico de ccavernas estão relacionadas às ações de controle prévio do nível das vibrações induzidas.

A partir dos dados do monitoramento sísmico, é possível verificar se os níveis de vibração estão em níveis aceitáveis no tocante as normas brasileiras, além de permitir atuar diretamente nas fontes geradoras de vibração para que elas se mantenham em níveis adequados. Da mesma forma, o monitoramento associado a um diagnóstico geológico-geotécnico também permitirá o aumento dos níveis toleráveis de vibrações em decorrência das condições específicas de cada caverna.

previously mapped actions that can be initiated immediately after records superior to those pre-determined have been identified, such as, for example, a new geostructural assessment of the cave. Figure 13 below presents an annual monitoring graph of seismographic monitoring in a ferriferous cave, where the main variables related to the seismographic control of blasting by explosives can be visualized.

In data management, it is extremely important to obtain the MIC values used, coordinates, and, if possible, the dismantling polygon for better correlation between its distance and the monitoring point. This information can be used as feedback to the projectional model to refine the attenuation equation, allowing the appropriate adjustment of the loads. Furthermore, geoprocessing of these data makes it possible to understand the seismic behavior of a given region, identifying places where there is attenuation or vibration level increase.

6 FINAL CONSIDERATIONS

Seismographic monitoring significantly improves the predictability of impacts in caves. However, commonly used engineering seismographs only respond to surface stimuli and are limited to point seismic responses. Therefore, to be more effective and to control possible changes in caves, this monitoring must be associated with other programmes, such as geostructural and photographic.

In addition, actions are needed that directly target the emission sources in order to control the level of induced vibrations in advance. This will minimize the effects of vibrations in the caves of interest.

Therefore, in general, good practices in seismic monitoring of caves are related to actions to previously control the level of induced vibrations.

Using seismic monitoring data, it is possible to check whether vibration levels are acceptable in terms of Brazilian standards, in addition to allowing direct action on sources that generate vibration so that they remain at adequate levels. Likewise, monitoring associated with a geological-geotechnical diagnosis will also allow an increase of tolerable levels of vibrations due to the specific conditions of each cave.

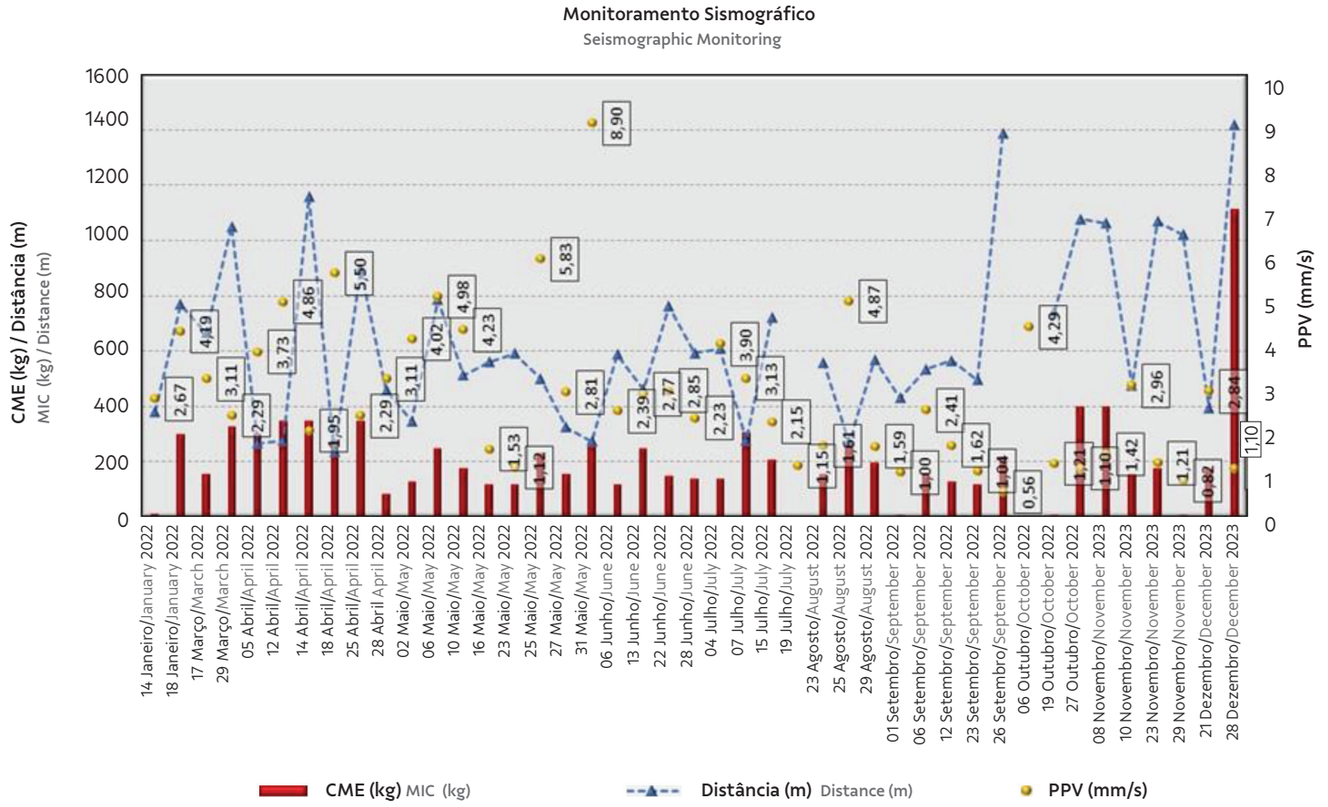


Figura 13: Gráfico de acompanhamento anual dos registros sismográficos e relação com a carga máxima por espera de explosivos e a distância em que ocorreram os desmontes.

Figure 13: Annual monitoring graph of seismographic records and relationship with the maximum charge per delay of explosives and the distance at which dismantling occurred.

O mapeamento geológico-geotécnico de uma caverna torna-se preponderante, em relação às métricas de monitoramento sísmico que serão adotadas, incluindo os controles que deverão ser implementados junto às fontes emissoras.

Pelo fato do monitoramento sísmico isoladamente não ser capaz de mensurar impactos em uma caverna, este monitoramento torna-se uma excelente ferramenta de controle operacional, tendo em vista, principalmente, a realização dos desmontes de rocha com utilização de explosivos.

Em resumo, o monitoramento sísmico é um conjunto de ações relacionadas à instrumentação de campo, ao tratamento estatístico e modelagem matemática para definição dos modelos projecionais de vibração e a implantação de controles operacionais, visando à manutenção da integridade física do patrimônio espeleológico de interesse, sem deixar de salientar a importante correlação com outros programas de monitoramento

The geological-geotechnical mapping of a cave becomes preponderant, in relation to the seismic monitoring metrics that will be adopted, including the controls that must be implemented with the emission sources.

Because seismic monitoring alone is not capable of measuring impacts in a cave, this monitoring becomes an excellent operational control tool, mainly considering the carrying out of rock dismantling using explosives.

In summary, seismic monitoring is a set of actions related to field instrumentation, statistical processing and mathematical modeling to define vibration projectional models and the implementation of operational controls, aiming to maintain the physical integrity of the speleological heritage of interest, without failing to highlight the important correlation with other physical environment monitoring programs, in the investigation

do meio físico, na investigação de eventos indesejáveis.

Embora este capítulo tenha sido elaborado com base na experiência obtida em cavernas em formação ferrífera, as práticas aqui sugeridas, em linha com os documentos de referência do tema, permitem que as orientações também sejam aplicadas em cavernas de outras litologias.

7 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Gerencia de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos da Vale pela confiança e oportunidade de desenvolvimento nessa linha de estudo. A toda equipe técnica da gerência pelas contribuições, incentivos e ensinamentos ao longo dessa jornada de "Espeleo". Ao Carlos Calle pelo rotineiro apoio nos trabalhos de sismografia e enriquecedoras discussões relacionadas ao tema. A todas às áreas de perfuração e desmonte da Vale pelo suporte nos ensaios e estudos realizados nas operações.

of undesirable events.

Although this chapter was prepared based on experience obtained in iron formation caves, the practices suggested here, in line with reference documents on the topic, allow the guidelines are also applied in caves of other lithologies.

7 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Vale's Speleology and Ferrous Technology Department for the trust and opportunity to develop this line of study. To the entire technical management team for their contributions, encouragement and teachings throughout this 'Speleological' journey. To Carlos Calle for his routine support in the seismography work and enriching discussions on the subject. To all of Vale's drilling and blasting areas for their support in the tests and studies carried out during operations.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AMORIM, L. F. M.; LUZZI, L.A.C.; BRANDI, I.V. Vibrações produzidas por fontes mecânicas e sua potencial interferência em cavernas ferríferas: estudo de caso da caverna MJ-0001, Quadrilátero Ferrífero, Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA: AS GEOTECNOLOGIAS E O SÉCULO XXI, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [ABNT (2018)]. **NBR 9653**: guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. São Paulo, 2018.

CATEN, C. S. T. *et al*. Influência do acoplamento de sismógrafos na resposta da vibração de partículas ou velocidade de partículas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, 3.; CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 3., 2004, Belo Horizonte. **Anais** [...] Belo Horizonte, 2004.

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. [CECAV (2011)]. Mapa brasileiro de potencialidade de ocorrência de cavernas. *In*: **Gov.br**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Potencialidades de ocorrências de cavernas. [*S.l.*], [2011].

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. [CECAV (2016a)]. **Sismografia aplicada ao patrimônio espeleológico**: contribuição técnica à análise de estudos ambientais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; ICMBio, 2016a.

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. [CECAV (2016b)]. **Sismografia aplicada ao patrimônio espeleológico**: orientações básica à realização de estudos ambientais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; ICMBio, 2016b.

DOWDING, C.H. **Blast Vibration Monitoring and Control**, C.H. Dowding, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1985, 297 pp.

DIAS, C.R.C.; *et al*. Registro fotográfico para o monitoramento de feições geoestruturais e geoespeleológicas em cavidades na Serra da Bocaina, sudeste do Pará. *In*: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (Orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32., 2013. Barreiras. **Anais**[...] Campinas: SBE, 2013. p.293-298.

DIAS, C. R. C. *et al*. Controle e monitoramento de vibrações em cavidades situadas em áreas diretamente afetadas pelo Ramal Ferroviário Sudeste do Pará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 47., 2014, Salvador. **Anais** [...] [*S.l.*], 2014.

GOULART, K. C. C; COSTA, J. L. C. L; **Influência do acoplamento de sismógrafos na resposta da vibração de partículas ou velocidade de partículas**. Artigo produzido. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Minas.

HOLDEN, B. M. **Low frequency improvements to commercial geophones**. 2014. 20 f. Master's Thesis (Science in Electrical Engineering) – Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, The Division of Electrical and Computer Engineering, 2014.

HONS, M. S. **Seismic sensing**: comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data. 2008. 157 f. Master's Thesis (Science) – Department of Geoscience, University of Calgary, Calgary, 2008.

INSTANTEL. **Minimate plus**: operator manual. Ottawa: Instantel Inc., 1990–2013.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F.J.A. **Drilling and blasting of rocks**. [London]: CRC Press, 1995.

KOC, G.; YEGIN, K. **Hardware desing of seismic sensors in wireless sensor network**. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013. DOI: https://doi.org/10.1155/2013/640692

PEREIRA, N. G. **Análise do posicionamento de equipamentos de sismografia em cavidades naturais subterrâneas**. 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SINGH, S. P. **Prediction and determination of explosive induced damage**. Balkema: Rock Fragmentation by Blasting, Rossmanith, 1993. p. 183–192. ISBN: 9054103167

TAPIA, C.C.H.; LUZZI, L.A.C. Interpretação do comportamento sismográfico nas rochas itabiríticas do Quadrilátero Ferrífero. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA: AS GEOTECNOLOGIAS E O SÉCULO XXI, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2016.

TORRES, V. F. N. *et al*. Assessing and controlling of bench blast-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring community. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 514–524, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.210

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2022**. [*S.l.*]: USGS, 2022. DOI: https://doi.org/10.3133/mcs2022



Teste de vibrações geradas por equipamentos mecânicos do tipo Minerador Contínuo de Superfície / Testing of vibrations generated by mechanical equipment such as Continuous Surface Miners
Foto/Photo: Leandro A. C. Luzzi



9

Caverna/Cave S11D_0001
Foto/Photo: André B. Machado

Monitoramento hidrológico em cavernas ferríferas

GEORGETE MACEDO DUTRA
LUCAS PADOAN DE SÁ GODINHO
IVIA LEMOS BARROSO
MAURICIO NICOLAU DE ASSIS BERTACHINI
RAFAEL SALVADOR NEVES COELHO
ALVARO COSTA FIGUEIREDO
LUIZ FELIPE LOPES
JULIO ALMEIDA MOREIRA
ANTÔNIO CARLOS BERTACHINI
MARIANA BARBOSA TIMO
RODRIGO DE PAULA HAMZI
FELIPE COSTA

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica hídrica desempenha um papel crucial na formação e na evolução das cavernas, especialmente em regiões ricas em minério de ferro e em outras rochas que contêm minerais do grupo dos óxidos e hidróxidos de ferro. Esta dinâmica, essencial para a manutenção da biodiversidade e da preservação de estruturas geológicas únicas, pode ser significativamente alterada por atividades antrópicas, tais como a mineração e a alteração do uso do solo. Estas intervenções humanas podem afetar os fluxos de água superficiais e subsuperficiais, levando a mudanças na qualidade e quantidade da água disponível, assim como na saúde geral dos ecossistemas cavernícolas.

Dada a sensibilidade desses ambientes, o monitoramento da dinâmica hídrica torna-se imperativo para compreender as alterações provocadas por tais atividades. Este monitoramento deve abranger tanto a qualidade quanto a quantidade da água, com especial atenção à zona vadosa, onde a interação entre água, ar e rocha é mais intensa. É crucial observar fatores como a frequência e a intensidade das precipitações e as características sazonais da água nas cavernas. Tais parâmetros são indicativos da saúde e estabilidade dos ecossistemas cavernícolas e podem fornecer *insights* valiosos para a conservação desses ambientes.

No contexto das cavernas formadas em minério de ferro ou rochas ricas em minerais do grupo dos óxidos e hidróxidos de ferro, como as formações ferríferas bandadas (FFB) e a canga, é fundamental caracterizar a entrada, o fluxo e a descarga da água subsuperficial.

Hydrological monitoring in ferriferous caves

GEORGETE MACEDO DUTRA
LUCAS PADOAN DE SÁ GODINHO
IVIA LEMOS BARROSO
MAURICIO NICOLAU DE ASSIS BERTACHINI
RAFAEL SALVADOR NEVES COELHO
ALVARO COSTA FIGUEIREDO
LUIZ FELIPE LOPES
JULIO ALMEIDA MOREIRA
ANTÔNIO CARLOS BERTACHINI
MARIANA BARBOSA TIMO
RODRIGO DE PAULA HAMZI
FELIPE COSTA

1 INTRODUCTION

Hydric dynamics plays a crucial role in the formation and evolution of caves, especially in regions rich in iron ore and other rocks containing minerals from the iron oxides and hydroxides group. These dynamics, essential for maintaining biodiversity and preserving unique geological structures, can be significantly altered by human activities, such as mining and changes in land use. Such human interventions can affect surface and subsurface water flows, leading to changes in the quality and quantity of available water, as well as to the overall health of cave ecosystems.

Given the sensitivity of these environments, monitoring hydric dynamics becomes imperative to understanding changes caused by such activities. This monitoring must cover both water quality and quantity, with special attention to vadose zone, where the interaction between water, air and rock is more intense. It is crucial to observe factors such as the frequency and intensity of precipitation and the seasonal characteristics of water in caves. Such parameters are indicative of the health and stability of cave ecosystems and can provide valuable insights for the conservation of these environments.

In the context of caves formed in iron ore or rocks rich in minerals from the iron oxides and hydroxides group, such as banded iron formations (BIFs) and canga, it is essential to characterize the entry, flow and discharge of subsurface water. These caves have striking

Geralmente, cavernas ferríferas apresentam características marcantes, como uma inserção pouco profunda em relação à superfície do relevo, um perfil inclinado acompanhando a vertente e a ocorrência de água de forma sazonal, evidenciando a dependência das precipitações (Figura 1).

O entendimento detalhado dessa dinâmica hidrogeológica, que em muitos aspectos diferencia-se do contexto "clássico" das cavernas formadas em rochas carbonáticas, depende, majoritariamente, da aplicação de métodos que permitam caracterizar a entrada, o fluxo e a descarga da água subsuperficial associada ao sistema atual e evolutivo de uma caverna ou conjunto de cavernas em minério de ferro.

Frente ao uso e à ocupação de terrenos que abrigam cavernas formadas em minério de ferro no Brasil, especialmente no âmbito das atividades de mineração no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, e na serra dos Carajás, estado do Pará, a compreensão desses processos hidrológicos constitui uma das bases de conhecimento mais importantes para a gestão ambiental e para a tomada de decisões relativas à preservação do patrimônio natural, geológico e espeleológico, bem como a compatibilização com a exploração dos recursos naturais no entorno.

Nesse contexto, o objetivo deste capítulo é apresentar e discutir os principais métodos aplicados à pesquisa hidrológica em cavernas formadas em minério de ferro, partindo do princípio de que o leitor possui um conhecimento básico de hidrogeologia.

characteristics, such as shallow insertion relative to the surface of the relief, an inclined profile following the slope and the occurrence of water on a seasonal basis, highlighting a dependence on precipitation (Figure 1).

The detailed understanding of hydrogeological dynamics in these caves, which in many aspects differs from the "classic" context of caves formed in carbonate rocks, depends mainly on the application of methods that allow characterizing the entry, flow and discharge of subsurface water associated with the current and evolutionary system of a cave or set of caves in iron ore.

In view of the use and occupation of land that houses caves formed in iron ore in Brazil, especially within the scope of mining activities in the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais, and in the Serra dos Carajás, state of Pará, the understanding of these hydrological processes constitutes one of the most important knowledge bases for environmental management and decision-making regarding the preservation of natural, geological and speleological heritage, as well as compatibility with the exploitation of natural resources in the surrounding area.

In this context, the the purpose of this chapter here is to present and discuss the main methods applied in hydrological research in caves formed in iron ore, assuming that the reader has a basic knowledge of hydrogeology. Representative examples

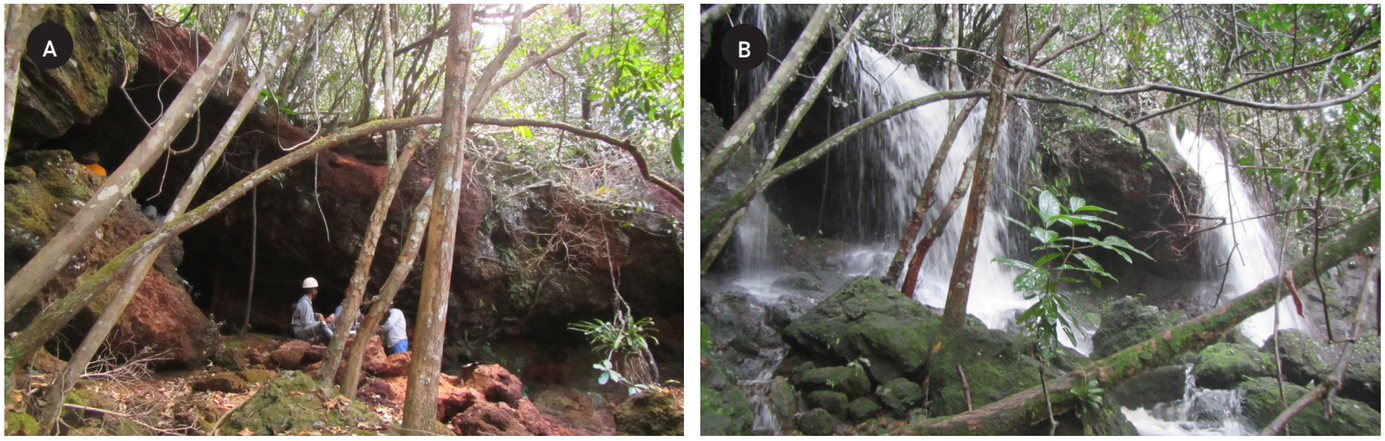


Figura 1: Caverna S11D_0001 localizada na Serra dos Carajás, Pará. Imagens comparativas entre junho de 2017 (estiagem A) e novembro de 2017 (período de chuvas B), destacando a presença sazonal de água. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 1: Cave S11D_0001 located in the Serra dos Carajás, Pará. Comparative images between June 2017 (dry season A) and November 2017 (rainy season B), highlighting the seasonal presence of water. Photos: Georgete Dutra.

Serão destacados exemplos representativos da aplicação desses métodos, com base na experiência adquirida por equipes técnicas de empresas como a Vale e outras consultorias, que atuaram em estudos de licenciamento e pesquisa nas últimas décadas.

2 PREMISSAS FUNDAMENTAIS SOBRE O MONITORAMENTO HÍDRICO

Todo sistema hidrológico natural obedece a algumas premissas fundamentais, segundo as quais existem entradas e saídas de água no sistema, em um volume ou quantidade que não se pode perder ou criar-se espontaneamente, segundo a lei da conservação da massa. Em outras palavras, a diferença entre a entrada e a saída de água em um sistema deve igualar-se à variação do armazenamento dentro dele. A essa relação de equilíbrio entre os diferentes componentes de um sistema hidrológico se dá o nome de *balanço hídrico*, que pode ser expresso segundo a equação abaixo (*e.g.* Manoel Filho, 2008):

$$P - ETR - R - I = \Delta S$$

Onde P é a precipitação, ETR é a evapotranspiração real, R é o escoamento superficial, ou deflúvio, I é a infiltração e ΔS é a variação no armazenamento.

Na aplicação de métodos hidrológicos para a análise de bacias fluviais convencionais ou até mesmo cársticas, o conceito de balanço hidrológico é fundamental, pois permite estimar quantitativamente os componentes de um sistema e obter informações práticas importantes para o cálculo de reservas aquíferas, para a previsão de variações no sistema pela alteração de uma de suas variáveis, além de constituir uma das premissas conceituais básicas para a modelagem numérica de fluxo, dentre outras aplicações. Apesar da importância deste conceito e dos métodos a ele associados, existem dificuldades em mensurar precisamente todos os componentes do balanço hídrico, sendo que cálculos para pequenas sub-bacias tendem a ser muito mais precisos e confiáveis do que estudos regionais compreendendo grandes bacias (Manoel Filho, 2008).

Para as cavernas em minério de ferro, que em geral possuem captações de água associadas a pequenas áreas das vertentes dos morros ou a pequenas sub-bacias, a aplicação da equação do balanço hídrico tem gerado discussões interessantes para questões práticas da mineração. Por exemplo, cavernas que se encontram localizadas abaixo da linha do talvegue de drenagens, apesar de ser um cenário pouco comum, costumam apresentar um grande volume de água

of the application of these methods will be highlighted, based on the experience acquired by technical teams from companies such as Vale and other consultancies, which have worked on licensing and research studies in recent decades.

2 FUNDAMENTAL ASSUMPTIONS ABOUT HYDRIC MONITORING

Every natural hydrological system obeys some fundamental premises, according to which there are inflows and outflows of water in the system, in a volume or quantity that cannot be lost or created spontaneously, according to the law of conservation of mass. In other words, the difference between water input and output for a system must equal the variation in storage within it. This balanced relationship between the different components of a hydrological system is called *water balance*, which can be expressed according to the equation below (e.g., Manoel Filho, 2008):

$$P - ETR - R - I = \Delta S$$

where P is precipitation, ETa is actual evapotranspiration, R is surface flow or runoff, I is infiltration, and ΔS is variation in storage.

When applying hydrological methods for the analysis of conventional or even karst river basins, the concept of water balance is fundamental, as it allows the quantitative estimation of the components of a system and the acquisition of important practical information for calculating aquifer reserves and forecasting variation in a system due to a change in of one of its variables. Water balance also constitutes one of the basic conceptual premises for numerical flow modeling, among other applications. Despite the importance of this concept and the methods associated with it, there are difficulties in precisely measuring all the components of water balance, and calculations for small sub-basins tend to be much more precise and reliable than regional studies comprising large basins (Manoel Filho, 2008).

The application of the water balance equation to ferriferous caves, which generally have water catchments associated with small areas of hillsides or small sub-basins, has generated interesting discussions regarding practical mining issues. For example, caves that are located below the drainage thalweg line, despite being an uncommon scenario, usually have a large volume of surface water that runs over the cave roof slab because of the

superficial que percorre sobre a laje do teto da caverna, fruto do fluxo convergente de uma sub-bacia de drenagem. No entanto, uma grande parte desse fluxo superficial, geralmente, não contribui para a infiltração e manutenção da dinâmica hídrica da caverna. O volume total de água que efetivamente se infiltra pode ser calculado pelo monitoramento de alguns parâmetros como a precipitação, o escoamento superficial e a taxa de evapotranspiração. Assim, a área da sub-bacia necessária para que a dinâmica atual da caverna seja mantida, garantindo o volume de infiltração para a caverna, pode ser também calculada evitando que a área de influência hídrica da caverna seja afetada pelo avanço de uma área de lavra, por exemplo.

Ressalta-se que a determinação da área da bacia responsável por garantir o aporte de água que, efetivamente, infiltra-se na caverna está relacionada somente à dinâmica atual desta, mas não necessariamente à sua dinâmica evolutiva, que por sua vez pode depender do volume total de água aportado pela sub-bacia a montante da caverna, uma vez que a ampliação das fraturas e descontinuidades do sistema, assim como a erosão em superfície, podem depender desses caudais totais[1]. Por sua vez, a redução do volume que escoa sobre a cavidade natural subterrânea pode ter origem natural ou por intervenções humanas[2]. Neste último caso pode afetar ou não a sua evolução. O grande problema é diferenciar uma evolução natural de uma evolução (impacto) induzida.

2.1 Monitoramento Pluviométrico

O diagnóstico, o mapeamento e a medição da área de influência hídrica e dos aportes oriundos das precipitações são essenciais para o entendimento da dinâmica hídrica nas cavidades naturais subterrâneas. Assim, devem ser caracterizados parâmetros que influenciam diretamente a entrada de águas e o escoamento superficial, tais como relevo, morfologia da vertente, geologia, solo, vegetação e condições de drenagem / infiltração.

convergent flow of a sub-drainage basin. However, a large part of this surface flow usually does not contribute to infiltration and maintenance of the cave's hydric dynamics. The total volume of water that effectively infiltrates can be calculated by monitoring certain parameters such as precipitation, surface runoff and evapotranspiration rate. Thus, the area of a sub-basin necessary for the current dynamics of the cave to be maintained, guaranteeing the volume of infiltration into the cave, can also be calculated and used to prevent the area of water influence of the cave from being affected by the advancement of a mining area, for example.

It should be noted that determining the area of a basin responsible for guaranteeing the supply of water that effectively infiltrates a cave is only related to its current dynamics, and not necessarily to its evolutionary dynamics, which in turn may depend on the total volume of water contributed by the sub-basin upstream of the cave, since the expansion of fractures and discontinuities in the system, as well as surface erosion, may depend on these total flows[1]. In turn, a reduction in the volume that flows over a cave can be of natural or human interventions[2]. In the latter case, it may or may not affect its evolution. The big problem is differentiating natural evolution from induced evolution (impact).

2.1 Rainfall Monitoring

The diagnosis, mapping and measurement of the area of water influence and inputs from precipitation are essential for understanding cave hydric dynamics. Therefore, parameters that directly influence water entry and surface runoff must be characterized, such as relief, slope morphology, geology, soil, vegetation and drainage/infiltration conditions.

1. Caudais Totais: Refere-se à quantidade total de água que flui para dentro de uma área específica, como uma caverna ou uma bacia hidrográfica, durante um período. Os caudais totais incluem tanto a água superficial quanto a água subterrânea que contribui para a alimentação da área em questão. Este fluxo de água é crucial para manter o equilíbrio ecológico da caverna, influenciando diretamente a sua estrutura, a biodiversidade e as reações químicas que ocorrem em seu interior. Os caudais totais podem ser afetados por variações climáticas, por mudanças na cobertura do solo e atividades humanas, alterando assim a dinâmica hídrica da caverna e de sua área de influência.

2. Intervenções Humanas: São ações ou atividades realizadas por seres humanos que alteram de forma significativa o ambiente natural, podendo afetar os ecossistemas de cavernas e as bacias hidrográficas associadas. Essas intervenções incluem desmatamento, agricultura, urbanização, mineração, e construção de barragens, que podem modificar o regime de água superficial e subterrânea, alterando os caudais totais e, consequentemente, afetando a estrutura e a função das cavernas. Porém, as intervenções não se limitam somente às mencionadas. Embora algumas delas possam ter impactos negativos, outras podem ser planejadas e executadas com o objetivo de conservação ou restauração, resultando em efeitos positivos ao sistema.

1. Total Flows: refers to the total amount of water flowing into a specific area, such as a cave or watershed, over a period of time. Total flows include both surface water and groundwater that contributes to feeding the area in question. This flow of water is crucial to maintaining the ecological balance of a cave, directly influencing its structure, biodiversity and the chemical reactions that occur inside. Total flows can be affected by climate variation, soil cover changes, and human activities, thus altering the hydric dynamics of the cave and its area of influence.

2. Human Interventions: these are actions or activities carried out by human beings that significantly alter the natural environment, potentially affecting cave ecosystems and associated river basins. These interventions include deforestation, agriculture, urbanization, mining, and dam construction, which can modify the surface and groundwater regime, altering total flows and, consequently, affecting the structure and function of caves. However, interventions are not limited to those mentioned. Although some human interventions may have negative impacts, others can be planned and executed with the objective of environmental conservation or restoration, resulting in positive effects on the system.

O monitoramento da precipitação meteórica nos permite quantificar o volume ou a vazão de água disponível na área de captação de uma vertente ou sub-bacia associada a uma caverna em minério de ferro. A comparação entre o sinal da precipitação e o sinal de descarga das nascentes também permite interpretações a respeito do comportamento hidrológico do sistema de condutos, sendo essa uma abordagem de estudo aplicada tanto em aquíferos cársticos (Larocque *et al.*, 1998) como em sistemas de cavernas em minério de ferro, conforme discussão que será exposta no subitem 2.2. Além disso, a precipitação é um dos elementos fundamentais para o cálculo do balanço hídrico, sendo importante para a determinação das taxas de recarga dos sistemas de cavernas.

A precipitação, seja na forma de chuva, de granizo ou de neve, pode ser medida em campo mediante a utilização de pluviômetros manuais, de pluviógrafos ou pluviômetros digitais, sendo estes equipamentos dotados de um sistema de coleta de água de chuva para medição em milímetros lineares, e que consistem, basicamente, em um recipiente coletor com um arco circular aberto na parte superior, instalado a cerca de 1,5m acima do nível do solo ((Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008). Em relação à sua instalação, deve-se atentar para a interferência da vegetação ou estruturas no equipamento. Assim, é aconselhável a sua instalação em locais abertos, longe da vegetação ou que tenham pelo menos 2 metros de diâmetros livres em torno do pluviógrafo, dependendo da altura das interferências.

Existem diversos modelos desses equipamentos disponíveis no mercado, sendo que os métodos de registro digital e o envio remoto automático dos dados têm ganhado cada vez mais espaço (Figura 2). Alternativamente, é possível investir em equipamentos de menor custo, mas que exigem visitas constantes a campo para o registro e coleta de dados, o que pode resultar em um custo maior a longo prazo, além de uma maior exposição da equipe técnica aos riscos associados às atividades de campo.

O tipo de rede de monitoramento mais adequada a ser utilizada dependerá de uma avaliação ou balanço entre os objetivos do projeto e os recursos disponíveis para a sua execução (Groves, 2007). Por exemplo, no caso da necessidade de uma ampla cobertura de área de monitoramento e com recursos limitados, é possível optar por instrumentos de menor custo, desde que seja possível dispor de uma equipe local para a coleta dos dados, ressaltando-se que, neste caso, o registro será na periodicidade (mm/dia). Caso o projeto demande uma

The volume or flow of water available in the catchment area of a slope or sub-basin associated with a ferriferous cave can be quantified by meteorological monitoring precipitation. Comparing the precipitation signal to the spring discharge signal also allows interpretations to be made regarding the hydrological behavior of the conduit system. This study approach is applied both in karst aquifers (Larocque *et al.*, 1998) and in cave systems in iron ore, as discussed in Section 2.2. Furthermore, precipitation is a fundamental element for calculating water balance, and is important for determining the recharge rates of cave systems.

Precipitation, whether in the form of rain, hail or snow, can be measured in the field using manual rain gauges, pluviographs or digital rain gauges. This equipment is equipped with a rainwater collection system for measurement in linear millimeters, which basically consists of a collection container with a circular arch open at the top, installed approximately 1.5m above ground level ((Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008). Installation must pay attention to potential interference of vegetation or other structures with the equipment. Therefore, it should be installed it in open places, away from vegetation or with at least 2 meters of free diameter around the rain gauge, depending on the height of the interference.

There are several models of such equipment available on the market, and digital recording methods and automatic remote sending of data have been gaining more and more space (Figure 2). Alternatively, it is possible to invest in lower-cost equipment, although this requires constant visits to the field to record and collect data, which can result in greater cost in the long term, in addition to greater exposure of the technical team to the risks associated with field activities.

The most appropriate type of monitoring network to use will depend on an assessment or balance between the project objectives and the resources available for its execution (Groves, 2007). For example, in the case of the need for a wide coverage of the monitoring area, yet with limited resources, it is possible to opt for lower cost instruments, as long as a local team can collect the data, highlighting that, in this case, the record will be in periodicity (mm/day). If a project requires greater data

maior precisão dos dados, com registro contínuo no tempo e talvez uma cobertura menor em área, os sistemas automáticos, apesar de mais dispendiosos financeiramente, podem ser os mais adequados. A periodicidade, neste caso, pode registrar precisamente até a ocorrência de mm/s e assinalar data, hora (minutos, segundos) e a duração de eventos pluviométricos.

É importante lembrar que os governos de diversos países mantêm redes de monitoramento meteorológico em todo o território nacional e disponibilizam dados públicos e gratuitos que podem ser de extrema valia, tanto para utilização como base principal de dados, como para comparação ou correção de séries históricas de dados adquiridos com recursos privados. No Brasil, algumas das bases de referência nesse sentido são o *Portal Hidroweb* da ANA (Agência Nacional de Águas) e o SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos) da SGB/CPRM Serviço Geológico do Brasil/A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) a nível nacional, dentre outras possíveis, em se tratando de órgãos ambientais estaduais ou municipais.

Caracterizar as precipitações é a chave para o entendimento da entrada de água no sistema hídrico associado as cavernas. Como as bacias ou áreas de influência hídrica associadas as cavidades naturais subterrâneas de ferro são restritas, geralmente bem inferiores a 10 quilômetros quadrados, a inserção de um pluviógrafo em bacias desta grandeza é representativo e suficiente na maioria dos casos.

precision, with continuous recording over time and perhaps a smaller coverage area, automatic systems, despite being more financially expensive, may be the most appropriate. The precision, in this case, shows records in mm/s, date, time (minutes and seconds) and duration of the rain.

It is important to remember that the governments of several countries maintain meteorological monitoring networks throughout the national territory and provide free public data that can be extremely valuable both for use as a main data base and for comparison or correction of historical data series acquired with private resources. Such reference bases in Brazil include the *Portal Hidroweb* of ANA (Agência Nacional de Águas) and the SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos) of SGB/CPRM (Serviço Geológico do Brasil/A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) at the national level, among other possibilities of state or municipal environmental bodies.

Characterizing precipitation is key to understanding water entry into the water system associated with caves. As the basins or areas of water influence associated with ferriferous caves are restricted, generally well under 10 square kilometers, the insertion of a pluviograph is representative and sufficient in most cases.



Figura 2: A) Pluviômetro digital com sistema automatizado instalado em um platô de canga na Serra dos Carajás, Pará. B) e C) Detalhes da instalação, com suporte e caixa de proteção do *data logger*. Fotos: A: Georgete Dutra, B e C: Daniel Galupo.
Figure 2: A) Digital pluviograph with automated system installed on a canga plateau in the Serra dos Carajás, Pará. B) and C) Installation details, with support and *data logger* protection box. Photos: A: Georgete Dutra, B e C: Daniel Galupo.

Vale destacar que a chuva possui energia potencial, sendo responsável pela erosão, transporte de sedimentos e matéria orgânica. Desta forma este monitoramento é sinérgico, auxiliando no entendimento da variação da umidade e da temperatura no interior das cavernas, do aporte e deposição de matéria orgânica e sedimentos, dos pontos de erosão e das deposições física e química atuais e pretéritas.

Na maioria dos estudos já realizados em cavernas associadas a formação ferrífera, foram utilizados pluviógrafos tipo báscula com *data loggers*, instalados na área de contribuição hídrica (Figura 3). Durante os trabalhos de campo, os dados dos equipamentos instalados são aferidos. É realizada a leitura e armazenamento das informações de pluviosidade nos *data loggers*, além da verificação das condições dos instrumentos e manutenção, caso seja necessário. Para descarregar os *data loggers*, é importante prever a utilização de computador ou *tablet* de campo com a instalação dos *softwares* requeridos.

Para as atividades de coleta de dados é recomendável visitas a campo pelo menos uma vez ao mês, durante o período chuvoso. Porém, condições climáticas ou problemas técnicos podem prejudicar a coleta de dados de tal modo que o *data logger* deve ser capaz de armazenar os dados dos instrumentos para que seja possível a aferição no mês seguinte. Concomitante

It is worth highlighting that rain has potential energy that is responsible for erosion, and the transport of sediments and organic matter. In this way, this monitoring is synergistic, helping to understand not only the variation in humidity and temperature inside caves, but also the input and deposition of organic matter and sediments, points of erosion and current and past physical and chemical deposition.

Most of the studies carried out in caves associated with the ferriferous formation have used weighbridge-type pluviographs with *data loggers*, installed in the area of water contribution (Figure 3). During the field work, the data from the installed equipment is checked. Rainfall information is read and stored in the *data loggers*, as well as checking the condition of the instruments and maintenance, if necessary. To download the *data loggers*, it is important to have a computer or tablet in the field with the required software installed.

Data collection activities should be performed during field visits at least once a month during the rainy season. However, weather conditions or technical problems can impair data collection to such an extent that the *data logger* must be able to store the data of the instruments so that measurements can be made the following month. Concomitantly with the



Figura 3: A) Foto de perfil mostrando exemplo de localização de pluviógrafos externo e interno. Básculas do pluviógrafo e B) instalação na AIH. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 3: A) Profile showing example of location of external and internal pluviographs. Digital pluviographs and B) installation at water influence area – AIH. Photos: Georgete Dutra.

com os trabalhados realizados na coleta de dados, a equipe deve observar a microbacia na qual a cavidade natural subterrânea se insere, a fim de caracterizar a área e fazer a relação do meio externo com o subterrâneo.

Atualmente, os programas de monitoramento têm utilizado pluviógrafo digital com capacidade para o registro de até 127 milímetros de chuva por hora, com uma capacidade de armazenamento de valores de até 3.200 milímetros. A fonte de energia é uma bateria de lítio do tipo CR-2032 de fácil substituição e que possui duração média de 2 meses, conforme a quantidade de registros realizados. No período chuvoso ocorre um maior consumo da bateria, uma vez que há maior número de registros. Para os demais períodos, deve ser observado o consumo do equipamento e adequar a periodicidade.

Sugere-se manter o *data logger* fora do balde de coleta, pois sua presença próximo ao imã pode acarretar no desgaste prematuro da bateria. Recomenda-se que o sensor seja alocado em caixa plástica vedada que permite a proteção contra o excesso de umidade e altas temperaturas, além de prevenir danos ao fio conector provocados por ações de vandalismo ou por animais silvestres, tais como roedores e formigas, entre outros. Mesmo com a presença da caixa plástica é indicada a colocação de naftalina para impedir a proliferação de formigas ou cupins, e de sílica para reduzir a umidade. Para evitar os danos causados por roedores, a dica é manter a quantidade mínima de fio exposto.

Em relação à manutenção, é recomendável a realização de visitas mensais para a verificação das condições do equipamento, como também ter em mãos alguns itens básicos tais como: bateria reserva, sílica gel, desumidificador, naftalina, chave de fenda (para retirada do fio conector do balde coletor) e chave de fenda cruzada (chave "Philips") para abertura do local onde se localiza a bateria. No interior do sensor, além da bateria, existe um pequeno pacote de sílica para evitar umidade.

2.2 Monitoramento do Fluxo D'água (vazão)

Após atingir o solo, parte da água trazida pela precipitação pode escoar superficialmente, infiltrar-se no subsolo ou retornar à atmosfera por evapotranspiração, segundo o conceito do *ciclo hidrológico*. Neste item, a discussão será focada nas águas que escoam superficialmente e nas águas que infiltram para o interior das cavernas em minério de ferro.

A quantificação do escoamento superficial é importante, pois permite descrever a variação da vazão dos córregos e rios superficiais, que muitas vezes atuam como pontos de descarga

data collection work, the team must observe the watershed in which the cave is located to characterize the area and establish a relationship between external and underground environments.

Current monitoring programs have used digital pluviographs with the capacity to record up to 127 millimeters of rain per hour, with a storage capacity of up to 3,200 millimeters. The power source is a CR-2032 lithium battery that is easy to replace and has an average duration of two months, depending on the number of records made. There is greater battery consumption during the rainy season, as there is a greater number of records. During other periods, the consumption of the equipment must be observed, and the frequency adjusted.

Should be kept outside the data logger, as its presence close to the magnet can cause premature battery wear. The sensor should be placed in a sealed plastic box that allows protection against excess humidity and high temperatures, in addition to preventing damage to the connector wire by vandalism or wild animals, such as rodents and ants, among others. Even with the use of a plastic box, naphthalene can be added to prevent the proliferation of ants or termites, as well as silica to reduce humidity. The amount of exposed wire should be minimized to avoid damage by rodents.

Monthly maintenance visits should be made to check the condition of the equipment. Basic items to have on hand during such visits include spare batteries, silica gel, dehumidifier, naphthalene, screwdriver (for removal of the collector bucket connector wire) and a cross screwdriver ("Phillips" screwdriver) to open the battery compartment. In addition to the battery, there is a small silica packet inside the sensor to prevent moisture.

2.2 Monitoring Water flow (Flow Rate)

After reaching the ground, the water brought by precipitation can flow superficially, infiltrate underground or return to the atmosphere through evapotranspiration, according to the concept of the *hydrological cycle*. The discussion here will focus on water that flows superficially and water that infiltrates into ferriferous caves.

Quantifying surface runoff is important because it allows variation in the flow of surface streams and rivers to be described These often act as discharge points for ferriferous

para os sistemas de caverna em minério de ferro ou, às vezes, podem atuar como alimentadores da infiltração sobre as lajes de canga ou minério de ferro que, eventualmente, estão interligados às cavernas por poros intergranulares e por redes de fraturas. Além disso, a caracterização do escoamento superficial permite realizar algumas operações importantes relativas ao balanço hídrico. Por exemplo, é possível estimar as taxas de infiltração de um canal influente pela diferença entre a vazão de um córrego em um determinado ponto de monitoramento e a vazão de águas da chuva estimada para a área de captação da bacia a montante desse ponto de monitoramento, que pode ser calculada através do método racional, especialmente em bacias ou zonas de captação de área relativamente pequena (*e.g.* Souza Pinto *et al.*, 1976), como é o caso das cavernas em minério de ferro. A quantificação da água que escoa no interior dessas cavernas, por outro lado, pode ser utilizada para expressar a infiltração associada a esse sistema, o tempo de resposta entre um evento de precipitação e a infiltração no interior dos condutos ou, até mesmo, a descarga final das surgências de cavernas.

Para a medição do fluxo d'água superficial, podem ser empregados diversos métodos de campo. Um exemplo comum é a utilização de molinetes ou micromolinetes para a medição da velocidade média de fluxo em um determinado canal (Figura 4), sendo que o produto entre essa medida e a área da seção transversal do canal determina a vazão, que normalmente é

cave systems or, sometimes, can act as infiltration feeders over the canga or iron ore slabs that are eventually connected to caves by intergranular pores and fracture networks. Furthermore, characterizing surface runoff makes it possible to carry out some important operations related to water balance. For example, the infiltration rates of an influential channel can be estimated from the difference between the flow of a stream at a given monitoring point and the estimated rainwater flow for the catchment area of the basin upstream of that monitoring point, which can be calculated using the rational method equation, especially in relatively small basins or catchment areas (*e.g.*, Souza Pinto et al., 1976), as is the case with ferriferous caves. Quantifying the water that flows inside these caves, on the other hand, can be used to express the infiltration associated with a system, the response time between a precipitation event and infiltration inside the conduits or even the end discharge of cave springs.

Several field methods can be used to measure surface water flow. A common example is the use of stainless-steel propeller type and pygmy flow meter type to measure the average flow velocity of a given channel (Figure 4). The product between this measurement and the cross-sectional area of the channel determines the flow rate, which is normally expressed in units such as liters per second (L/s) or cubic meters per second



Figura 4: A) Utilização de um micromolinete de conchas para a determinação da velocidade média de fluxo em um pequeno canal superficial sobre a canga. B) Régua linimétrica com medição automática. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 4: A) Use of pygmy to determine average flow velocity in a small superficial channel over canga. B) Linimetric ruler with automatic measurement. Photos: Georgete Dutra.

expressa em unidades como litros por segundo (L/s) ou metros cúbicos por segundo (m^3/s) ou mesmo metros cúbicos por hora (m^3/h). É importante ressaltar que essas medidas de vazão podem ser acompanhadas concomitantemente por um registro da altura da lâmina d'água a partir de réguas linimétricas, instaladas sobre a mesma seção de medição da velocidade do fluxo, para a confecção da *curva chave*, um gráfico que correlaciona a variação de vazão pela altura do nível d'água registrado pela régua. Após a calibração da curva chave através de um espaço amostral de dados representativo, que normalmente compreende ao menos um ano hidrológico completo, é possível realizar as medições de vazão pela simples leitura do nível d'água na régua e comparar esse dado à medida de vazão correspondente na curva chave.

Estações de monitoramento contínuo da vazão, a exemplo dos vertedouros, também podem ser utilizadas tanto em canais de águas superficiais como nas saídas dos córregos intermitentes de cavernas (Figura 5). Esses equipamentos utilizam equações que descrevem a saída de água a partir de uma seção com geometria conhecida para determinar a vazão. O formato da seção do vertedouro e suas dimensões devem respeitar alguns padrões (ABNT), sendo que a escolha do tipo ideal depende da ordem de grandeza das vazões esperadas para um determinado canal.

O monitoramento em campo pode ser feito com o uso de diversos tipos de equipamentos, como contadores de gotejamento automáticos ou, mais comumente, pluviômetros

(m³/s) or even cubic meters per hour (m³/h). It is important to highlight that these flow measurements can be accompanied by a simultaneous record of water depth using linimetric rulers installed on the same channel section to create the key curve — a graph that correlates flow variation with water level height recorded by the ruler. After calibrating the key curve using a representative data sample space, which normally comprises at least one complete hydrological year, flow measurements can be taken by simply reading the water level on the ruler and comparing the data to the corresponding flow measurement of the key curve.

Continuous flow monitoring stations, such as spillways, can also be used both in surface water channels and at the exits of intermittent cave streams (Figure 5). This equipment uses equations that describe the water output from a section with known geometry to determine the flow rate. The shape of the spillway section and its dimensions must comply with some standards (ABNT), and the choice of the ideal type depends on the order of magnitude of the expected flows for a given channel.

Field monitoring can be done using different types of equipment, such as automatic drip counters or, more commonly, rain gauges installed under drips. Very extensive infiltration

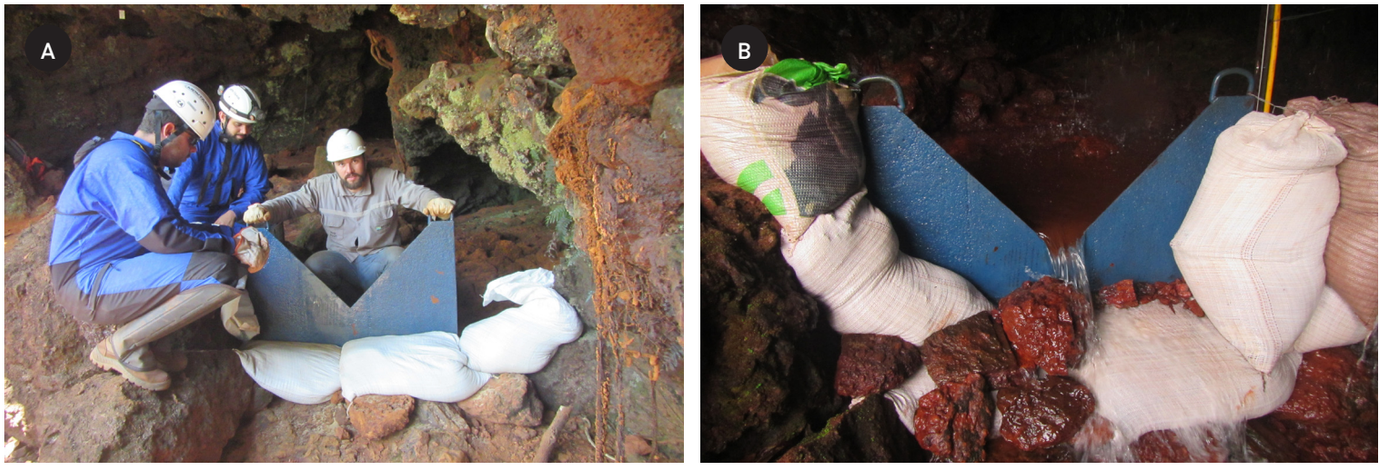


Figura 5: Vertedouro de seção triangular de 90° instalado em uma surgência de descarga intermitente de uma caverna em minério de ferro. A) À esquerda, observa-se o canal seco, durante a instalação. B) À direita, o vertedouro em funcionamento durante as chuvas. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 5: Spillway with 90° triangular section installed in an intermittent discharge emergence from a ferriferous cave. A) On the left, the dry channel can be seen during installation. B) On the right, the spillway in operation during rains. Photos: Georgete Dutra.

instalados sob os gotejamentos. Pontos de infiltração muito extensos, como fraturas abertas ou canalículos com diâmetro de abertura relativamente grande, podem ter o seu fluxo concentrado com auxílio de uma lona impermeável e conduzido para o equipamento que fará o registro das medidas de vazão. Ressalta-se que os *data loggers* dos equipamentos internos devem estar sincronizados (mesmo horário) com os equipamentos externos, permitindo obter a diferença de tempo os picos dos eventos chuvosos e o aporte das águas, bem como se a chuva foi suficiente para atingir a caverna (dados de saturação do solo), etc., o que será detalhado no próximo item.

Pontos de escoamento de baixa vazão, como pequenos canais ou gotejamentos, também podem ter sua vazão mensurada pelo método volumétrico, que consiste na utilização de um recipiente de volume conhecido e um cronômetro para calcular o volume de água conduzido por unidade de tempo (litros por segundo – L/s), como pode ser observado na Figura 6. Apesar da simplicidade do método, ele é muito preciso, útil e barato. Recomenda-se realizar no mínimo três medições para cálculo da média, ressaltando que valores muito discrepantes devem ser descartados.

2.2.1 Monitoramento de Nascentes de Cavernas em Minério de Ferro

Para proceder com o monitoramento de nascentes em cavernas é necessário conhecer a quantidade de água que sai do sistema, sendo importante monitorar a sua vazão. A descarga de um sistema hidrológico conectado a uma caverna na zona vadosa

points, such as open fractures or canaliculi with a relatively large diameter opening, can have their flow concentrated by a waterproof canvas and guided to the equipment that will record flow measurements. It should be noted that the *data loggers* of the internal equipment must be synchronized (same time) with the external equipment, allowing data to be obtained the difference the time between between the peaks of rainfall events and the input of water, as well as whether the rain was sufficient to reach the cave (soil saturation data), etc., which will be detailed in the next item.

Low flow points, such as small channels or drips, can also have their flow measured using the volumetric method, which consists of using a container of known volume and a stopwatch to calculate the volume of water conveyed per unit of time (liters per second – L/s), as can be seen in Figure 6. Despite the simplicity of the method, it is very accurate, useful and cheap. It is recommended that at least three measurements be taken to calculate an average, with very discrepant values being discarded.

2.2.1 Monitoring Springs of Ferriferous Caves

To monitor springs in caves, it is necessary to know the amount of water that leaves the system, and it is important to monitor its flow rate. Discharge from a hydrological system connected to a cave in the vadose zone can be represented



Figura 6: Medição de vazão por método volumétrico, utilizando um recipiente de volume conhecido e um cronômetro, para determinar a vazão em litros por segundo. Foto: Georgete Dutra.
Figure 6: Flow measurement by volumetric method, using a bucket of known volume and a stopwatch, to determine the flow in liters per second. Photo: Georgete Dutra.

pode ser representada por meio do monitoramento da vazão de sua nascente intermitente. A representação gráfica da variação dessa vazão ao longo do tempo, o hidrograma, é importante nos programas de monitoramento, pois permite descrever os padrões de fluxo no interior da caverna, como por exemplo o tempo de "retardo", que consiste na diferença de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma, além de outros processos que controlam as curvas de ascensão e recessão do hidrograma.

De forma geral, o fluxo dessas nascentes é tipicamente intermitente, retornando sempre para uma vazão igual a zero pouco tempo após os eventos de chuva, conforme representado na Figura 7. Os principais fatores que contribuem para essa alta amplitude de variação de vazão são: (i) as curtas distâncias entre o ponto de infiltração em superfície e os condutos, definidas pela espessura de rocha acima do teto da caverna (Figura 8); (ii) o fato dessas cavernas estarem inseridas em cota acima do N.A. (Nível do Aquífero), o que define um canal perdedor, cuja vazão diminui no sentido a jusante devido à infiltração; (iii) a alta permeabilidade da rocha fraturada ou da canga, que favorece uma rápida infiltração.

No entanto, existem muitas nascentes que ocorrem a partir de maciços rochosos de FFB e que não estão relacionados a cavernas. Essas nascentes "clássicas" ou típicas das formações ferríferas possuem um comportamento hidrológico muito distinto das nascentes que ocorrem em cavernas em minério de ferro, sendo válido abordar aqui algumas considerações apenas a título de comparação. As nascentes típicas em FFB são abastecidas por um aquífero de porosidade intergranular, diferentemente das nascentes de cavernas em minério de ferro, que são abastecidas pelo fluxo hipodérmico, pela zona subcutânea ou pela infiltração direta. Quando a FFB é submetida à lixiviação da sílica pelo fluxo d'água subterrânea, a rocha alterada pode tornar-se friável e granular, com características de condutividade hidráulica, de transmissividade e de armazenamento muito semelhantes as de um arenito permeável. Portanto, a descarga de nascentes associadas a esse tipo de aquífero costuma apresentar pouca variabilidade de vazão. Essas características hidrológicas contrastam muito com as de nascentes em cavernas em minério de ferro, que apresentam alta variabilidade, típicas de um sistema reservatório pequeno e abastecido diretamente pelas águas pluviais e/ou por fluxo subsuperficial.

A Figura 9 ilustra o comportamento da vazão em três córregos distintos, localizados no município de Nova Lima, estado de Minas

by monitoring the flow of its intermittent spring. The graphic representation of the variation of this flow over time, the hydrogram, is important in monitoring programs as it allows the flow patterns inside the cave to be described, such as the "delay" time, which consists of the difference in time between the center of mass of precipitation and the center of gravity of the hydrogram, in addition to other processes that control the ascension and recession curves of the hydrogram.

In general, the flow of these springs is typically intermittent, always returning to a flow rate equal to zero shortly after rain events, as represented in Figure 7. The main factors that contribute to this high amplitude of flow variation are: (i) the short distances between the surface infiltration point and the conduits, defined by the thickness of rock above the cave ceiling (Figure 8); (ii) the fact that these caves are located at a level above the W.L. (Water Level), which defines a losing channel, whose flow decreases in the downstream direction due to infiltration; and (iii) the high permeability of the fractured rock or canga, which favors rapid infiltration.

However, there are many springs that occur from BIF rock masses that are not related to caves. These "classic" or typical springs of iron formations have a very different hydrological behavior from springs that occur within ferriferous caves, and it is worth addressing some considerations here just for the sake of comparison. Typical springs in BIFs are supplied by an aquifer with intergranular porosity, unlike springs in ferriferous caves, which are supplied by hypodermic flow, the subcutaneous zone or direct infiltration. When BIF is subjected to silica leaching by groundwater flow, the altered rock can become friable and granular, with hydraulic conductivity, transmissivity and storage characteristics very similar to those of permeable sandstone. Therefore, the discharge from springs associated with this type of aquifer usually presents little flow variability. These hydrological characteristics contrast greatly with those of springs in ferriferous caves, which present high variability, typical of a small reservoir system supplied directly by rainwater and/or subsurface flow.

Figure 9 illustrates the flow behavior in three different streams located in the municipality of Nova Lima, state of Minas

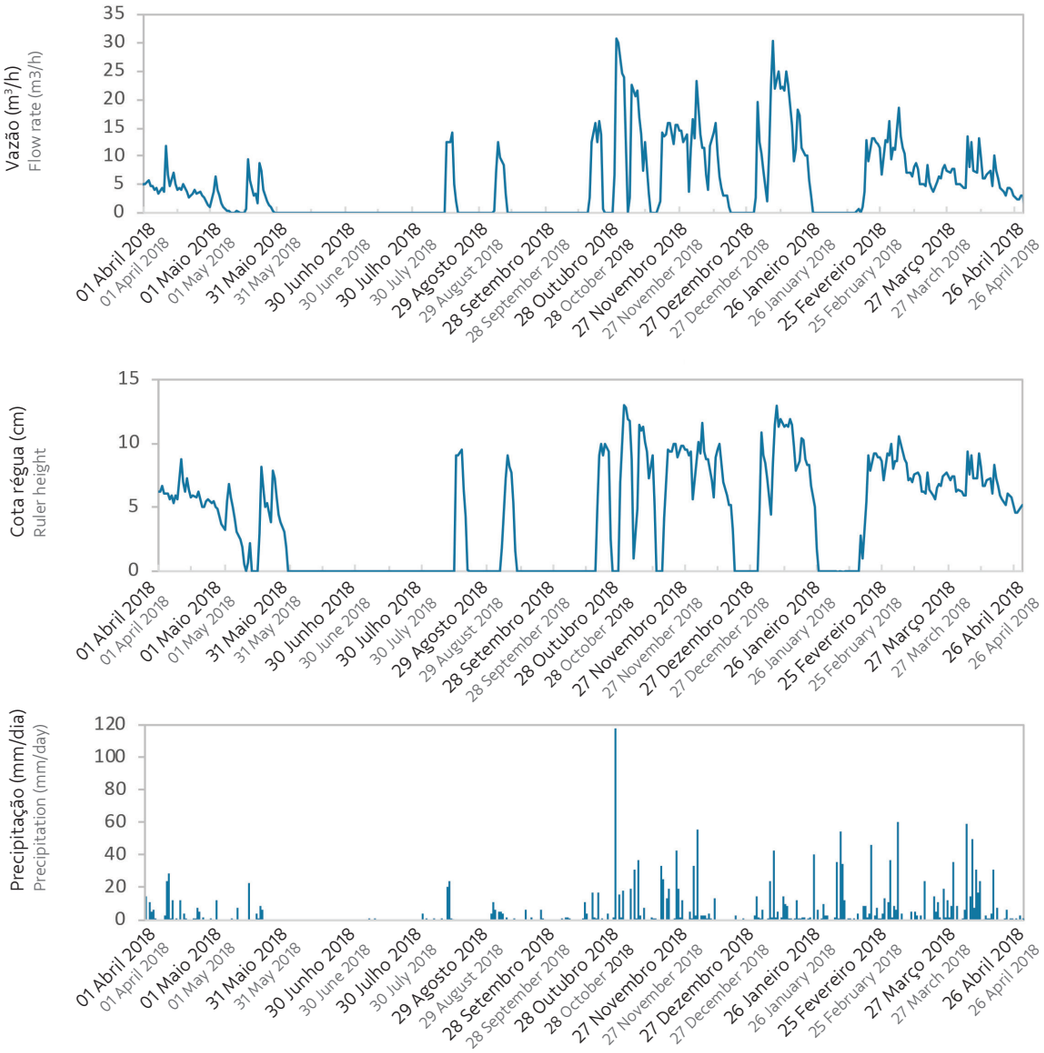


Figura 7: Hidrograma da nascente intermitente de uma caverna formada em canga, associada a uma pequena sub-bacia da Serra dos Carajás, estado do Pará. O hidrograma é comparado aos gráficos de leituras do nível da régua no ponto de monitoramento da nascente e das precipitações em superfície. Observa-se que as descargas se concentram no período chuvoso e que as vazões sempre retornam ao valor zero após os eventos de chuva. Extraído de MDGEO (2020).

Figure 7: Hydrogram of the intermittent spring of a cave formed in canga, associated with a small sub-basin of Serra dos Carajás, state of Pará. The hydrogram is compared to graphs of ruler-level readings at the spring monitoring point and surface precipitation. It can be seen that discharges are concentrated during the rainy season and flow always returns to zero after rain events. Extracted from MDGEO (2020).

Gerais, sendo que nenhum deles possui relação com cavernas e são aqui abordados apenas a título de comparação com o tema principal deste capítulo. A curva com baixa variabilidade de vazão (Fechos Auxiliar) corresponde à descarga de um aquífero em FFB. Trata-se de um reservatório de água subterrânea volumoso e com alta capacidade de regularização. Já a curva com alta variabilidade (Ribeirão Mutuca) corresponde a reservatórios

Gerais, none of which are related to caves and are discussed here only as a comparison with the main theme of this chapter. The curve with low flow variability (Fechos Auxiliar) corresponds to the discharge of an aquifer in BIF. It is a voluminous underground water reservoir with a high regularization capacity. The curve with high variability (Ribeirão Mutuca) corresponds to small reservoirs of schist and phyllite, with low permeability. Finally, the



Figura 8:Espessura reduzida da canga formando o teto das cavidades naturais subterrâneas associadas à formação ferrífera. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 8: Reduced thickness of canga forming the roof of caves associated with iron formations. Photos: Georgete Dutra.

pequenos de xistos e filitos, com baixa permeabilidade. Por fim, a curva intermitente (Córrego Seco) corresponde a um curso d'água sobre FFB, situado a montante da surgência de Fechos Auxiliar. O canal é intermitente, pois sua elevação encontra-se acima da cota do N.A., sendo então um curso d'água perdedor, que sofre infiltração no sentido a jusante. Esse último cenário é o que mais se assemelha ao caso das nascentes intermitentes que se originam das cavernas em minério de ferro.

Cada solo, dependendo da textura e porosidade, possui uma curva de retenção característica. As cangas possuem porosidade secundária através de descontinuidades e, devido à pequena espessura (geralmente entre 5 e 3 metros) possuem baixa capacidade de armazenamento. O relevo íngreme encontrado nas vertentes propicia a perda de água pluvial de forma rápida,

intermittent curve (Córrego Seco) corresponds to a watercourse over BIF, located upstream of the emergence of Fechos Auxiliar. The channel is intermittent, as its elevation is above the A.L., making it a losing watercourse, which suffers infiltration in the downstream direction. This last scenario is the one that most resembles the case of intermittent springs that originate from ferriferous caves.

Each soil, depending on its texture and porosity, has a characteristic retention curve. Cangas have secondary porosity through discontinuities and, due to their narrow thickness (generally between 5 and 3 meters), they have low storage capacity. The steep relief found on slopes leads to a rapid loss of rainwater, while in flat areas water can be retained during

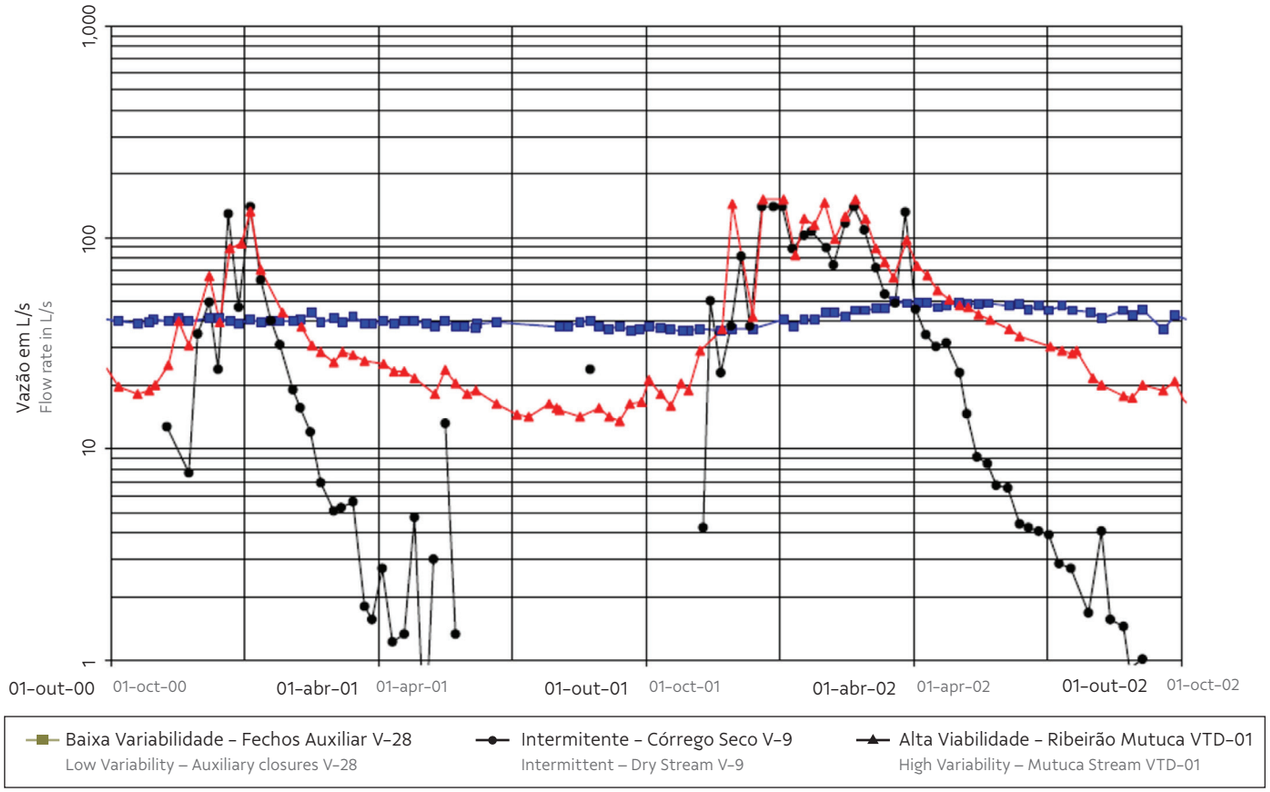


Figura 9: Hidrogramas representando três cursos d'água distintos localizados no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), com baixa variabilidade, alta variabilidade e intermitente. Dados cedidos pela empresa MDGEO.
Figure 9: Hydrograms representing three distinct watercourses located in the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), with low variability, high variability and intermittent variability. Data provided by the company MDGEO.

enquanto nas áreas planas a água pode ficar retida durante a estação chuvosa. Quanto mais tempo a água fica retida, maior é possibilidade de infiltração (movimento vertical), desde que não esteja exposta ao sol, pois, neste caso, haverá evaporação. Estudos de flora mostram que a variação sazonal de umidade em canga não é expressiva (Ataíde, 2010), corroborando com a tese de que a principal porosidade é a secundária.

A grande heterogeneidade da rocha em relação tanto aos constituintes quanto à dimensão dos clastos da canga, provavelmente, favorece rotas de fluxo menos espaçadas entre si, assegurando um padrão verticalizado para a infiltração de água. A inclinação da vertente e o grau de saturação também influenciam a área de contribuição de águas nas cavidades naturais subterrâneas. Quando a precipitação é mais elevada que a capacidade de retenção de água no solo, ocorre o escoamento superficial direcionando as águas diretamente às drenagens

the rainy season. The longer the water is retained, the greater the possibility of infiltration (vertical movement), as long as it is not exposed to the sun, as in this case there will be evaporation. Flora studies show that seasonal variation in humidity in canga is not significant (Ataíde, 2010), corroborating the thesis that the main porosity is secondary.

The great heterogeneity of the rock in relation to both the constituents and the size of the canga clasts probably favors flow routes that are less spaced from each other, ensuring a vertical pattern for water infiltration. The steepness of the slope and the degree of saturation also influence the area of water contribution to caves. When precipitation is higher than the soil's water retention capacity, surface runoff occurs, directing water

(zonas de descarga). Neste caso, principalmente nas vertentes com inclinação elevada, a infiltração é mínima.

A precipitação menos intensa favorece a infiltração nas vertentes, onde haverá o predomínio do escoamento com infiltração, principalmente nas descontinuidades. A infiltração ocorrerá de forma vertical com pequenos deslocamentos laterais. Neste caso, a definição da área de influência hídrica potencial (maior área onde as águas podem atingir a cavidade) pode ser definida pelo ponto mais distante onde as águas são direcionadas à caverna.

A capacidade de infiltração na canga será proporcional ao diâmetro de abertura das descontinuidades. Similarmente, pode-se imaginar um ralo com uma mesma coluna de água (pressão atmosférica). Não adiantará aumentar a quantidade de água, pois sua vazão se manterá constante. Da mesma forma, não adiantará aumentar a área de contribuição a montante da cavidade natural subterrânea com o intuito de aumentar a vazão. O que se observará são grandes áreas a montante das cavidades e as mesmas apresentando somente gotejamentos ou poças de água; ou seja, não é o tamanho da área de captação que garante o aporte hídrico à cavidade. Neste caso, o fator mais relevante são as descontinuidades abertas a montante da cavidade natural subterrânea. Ressalte-se que é muito difícil o mapeamento destas descontinuidades (obliteração pela vegetação, solo e a própria canga) utilizando-se de métodos indiretos ou mesmo da geofísica.

3 MONITORAMENTO DO TEMPO E ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO

A percolação de água de chuva através do maciço rochoso é importante para a preservação da atividade hídrica no interior da caverna, resultando na preservação dos processos de gênese de espeleotemas e manutenção da umidade, sendo esta última extremamente importante para a fauna. As águas da chuva podem escoar superficialmente ou infiltrar, sendo a infiltração predominantemente vertical até atingir alguma descontinuidade que possa favorecer fluxos horizontais.

Como dito anteriormente, a forma e a taxa de infiltração irão depender de fatores físicos da rocha, da composição e granulometria, da atitude das camadas, da presença de descontinuidades, da penetratividade destas descontinuidades, da espessura das camadas acima da cavidade, da declividade e da forma da vertente, da vegetação, etc.

directly to drainages (discharge zones). In this case, especially on steep slopes, infiltration is minimal.

Less intense precipitation favors infiltration on slopes, where runoff with infiltration will predominate, especially at discontinuities. Infiltration will occur vertically with small lateral displacements. In this case, the definition of the area of potential water influence (largest area where water can reach a cave) can be defined by the furthest point where water is directed to the cave.

The infiltration capacity in canga will be proportional to the opening diameter of the discontinuities. Similarly, one can imagine a drain with the same water column (atmospheric pressure) — there will be no point in increasing the amount of water, as its flow will remain constant. Likewise, there will be no point in increasing the contribution area upstream of the cave to increase flow. What will be observed are large areas upstream of caves with only drips or puddles of water; in other words, it is not the size of the catchment area that guarantees the water supply to a cave. In this case, the most relevant factor is the open discontinuities upstream of the cave. It should be noted that it is very difficult to map these discontinuities (obliteration by vegetation, soil and canga itself) using indirect methods or even geophysics.

3 WEATHER MONITORING AND INFILTRATION RATE ESTIMATION

The percolation of rainwater through the rock mass is important for the preservation of water activity inside a cave, resulting in the preservation of speleothem genesis processes and maintenance of humidity, the latter being extremely important for fauna. Rainwater can flow superficially or infiltrate, with infiltration being predominantly vertical until reaching some discontinuity that can favor horizontal flows.

As previously stated, the form and rate of infiltration will depend on physical factors of the rock, the composition and granulometry, the attitude of the layers, the presence of discontinuities, the penetrability of these discontinuities, the thickness of the layers above the cave, the declivity and the shape of the slope, vegetation, etc.

As cavernas ferríferas, em geral, encontram-se inseridas próximo à superfície, o que, aliado à porosidade secundária da canga e à presença de estruturas subverticais permitem a conexão rápida dos fluxos infiltrados sobre a vertente na zona imediatamente acima da caverna. Durante as chuvas, há um aumento da quantidade de gotejamentos no interior das cavidades, podendo até mesmo ocorrer fluxos torrenciais temporários com duração concomitante com a chuva, desde que as camadas superiores à cavidade estejam saturadas.

Os estudos sobre a pluviometria aliados a dados oriundos dos pluviógrafos no interior da cavidade natural subterrânea (percolação) visam avaliar o processo de infiltração, mostrando o tempo necessário para que ocorra infiltração, percolação e estimativa da quantidade de água infiltrada. As precipitações são a entrada de água no sistema. Como saída de águas, há a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial.

Para isto, no interior das cavidades naturais subterrâneas são instalados contadores de gotas ou pluviógrafos para estimar a quantidade e variação das águas infiltradas. Para a medição da vazão de água que adentra a cavidade, o mesmo pluviógrafo instalado em áreas externas pode ser utilizado (Figura 10).

Para o início do monitoramento interno, deve ser realizada uma inspeção prévia na caverna durante a estação chuvosa visando o mapeamento do seu aporte hídrico. Essa atividade auxilia sobremaneira na identificação dos locais de gotejamento, assim como na intensidade desses gotejamentos. A medição da intensidade dos gotejamentos pode ser feita pela contagem das

Ferriferous caves, in general, are located close to the surface, which, combined with the secondary porosity of the canga and the presence of subvertical structures, allows the rapid connection of infiltrated flows over the slope in the area immediately above the cave. During rains, there is an increase in the amount of dripping inside caves and there may even be temporary torrential flows lasting concomitantly with rain, as long as the layers above the cave are saturated.

Studies on rainfall combined with data from pluviographs inside caves (percolation) aim to evaluate the infiltration process, showing the time required for infiltration and percolation to occur, and estimating the amount of infiltrated water. Precipitation is the entry of water into the system, while evapotranspiration, infiltration and surface runoff are water output.

To this end, drop counters or pluviographs are installed inside caves to estimate the quantity and variation of infiltrated water. The water flow that enters a cave can be measured using the same rain gauge installed in external areas (Figure 10).

To begin internal monitoring, a prior inspection must be carried out within the cave during the rainy season to map its water supply. This activity greatly helps in identifying dripping locations, as well as the intensity of these drips. Measuring the intensity of drips can be done by counting the number of drops per minute. Prior inspection also allows the identification of

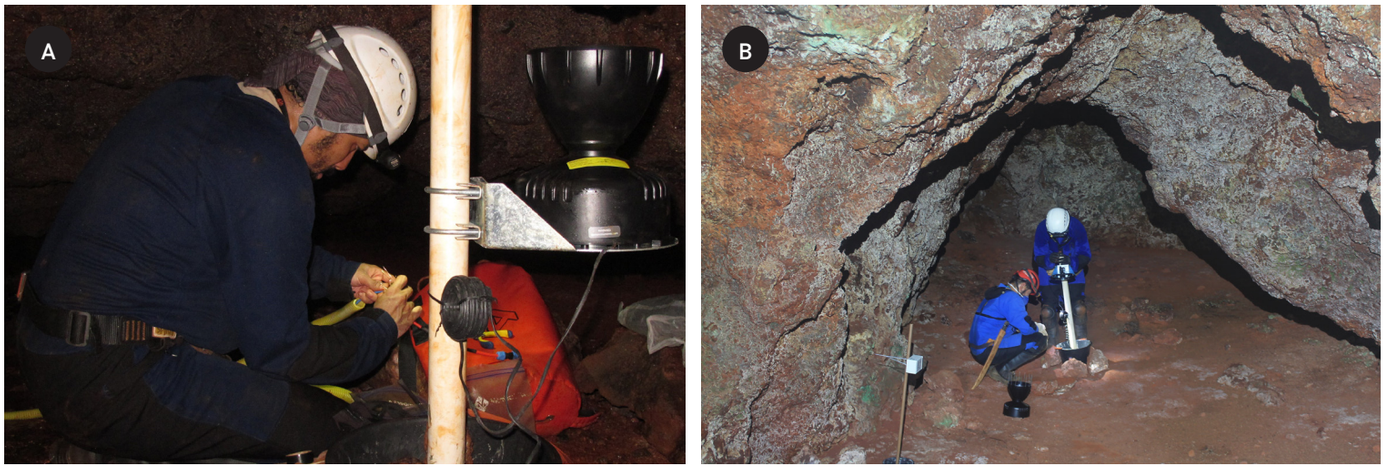


Figura 10: Pluviógrafos instalados no interior de cavidades naturais subterrâneas associadas à formação ferrífera. Fotos: A: Spelayon, B: Charli Finamore.
Figure 10: Pluviographs installed inside caves associated with the iron formations. Photos: A: Spelayon, B: Charli Finamore.

gotas por minuto. A inspeção prévia permite ainda a identificação de locais onde o equipamento não deve ser instalado, tais como salões onde ocorrem alagamentos, evitando assim danos ao equipamento ou até mesmo a sua perda.

Os pontos de água no interior da cavidade natural subterrânea devem ser mapeados ao longo do tempo, com a identificação no croqui ou mapa topográfico dos locais de gotejamento, de percolação e de jatos de água nos condutos, sempre a cada campanha (Figura 11). Além disso, deve ser realizada avaliação dos pontos de infiltração no meio hipógeo, identificando fraturamentos ou zonas de acúmulo de água, descrição da rocha encaixante, com variações na litologia e estruturas. Por fim, devem ser selecionados pontos estratégicos dentro da cavidade natural subterrânea para o posicionamento adequado dos pluviógrafos.

De posse das informações dos locais de alagamento, gotejamento e suas intensidades, as informações devem ser lançadas no croqui topográfico da cavidade que permitirá uma visão geral e a escolha dos locais mais apropriados para a instalação do pluviógrafo.

O equipamento deve ser instalado em uma superfície plana, nivelado e livre de perturbações (fluxos de ar, movimentos de animais, etc.). Aconselha-se o uso de calços para nivelar corretamente o equipamento. Deve-se procurar um local onde não ocorra a presença de blocos ou obstáculos próximos, de modo a evitar interferência na medição através de respingos.

Assim como o equipamento externo, o sensor deve ser alocado em caixa plástica vedada que permite a proteção contra o excesso de umidade, altas temperaturas e danos ao fio conector. Os mesmos cuidados anteriormente expostos devem ser tomados para equipamentos instalados no interior de cavernas.

Alguns parâmetros devem ser levados em consideração quanto ao cálculo da taxa de infiltração. No início, quando as lateritas ou cangas apresentam-se secas, parte da água é absorvida pelo solo. Neste caso, a velocidade de infiltração é alta, mas esta água não alcança os pontos de monitoramento no interior da cavidade natural subterrânea – ficam retidas no próprio solo. Posteriormente, com a continuidade das chuvas, o solo fica encharcado e a água passa a alcançar os pontos de monitoramento no interior da cavidade. A tendência, neste caso, seria ter vazões relativamente constantes proporcionais à quantidade de chuva. De acordo com a literatura (Quadros, 2015), os valores de infiltração básica para solos argilosos são inferiores a 5 mm/h e para solos arenosos são superiores a 30 mm/h. A seguir, exemplifica-se o monitoramento de chuva / infiltração.

places where equipment should not be installed, such as rooms where flooding occurs, thus avoiding damage to the equipment or even its loss.

The water points inside a cave must be mapped over time, identifying on a sketch or topographic map the locations of dripping, percolation and water jets in the conduits during each campaign (Figure 11). In addition, an assessment of infiltration points in the hypogeal environment must be carried out to identify fractures or water accumulation zones, with descriptions of the surrounding rock including variations in lithology and structures. Finally, strategic points must be selected within the cave for the appropriate positioning of pluviographs.

Once information on the locations of flooding and dripping, and their intensities, is obtained, it needs to be added to a topographic sketch of the cavity, which will allow an overview and the choice of the most appropriate locations for installing the pluviograph to be made.

The equipment must be installed on a flat, level surface where it will be free from disturbances (air flows, animal movements, etc.). It is advisable to use shims to correctly level the equipment. It is essential to find a place where there are no blocks or obstacles nearby to avoid splashes from interfering with measurements.

Just like the external equipment, the sensor must be placed in a sealed plastic box that allows protection against excess humidity, high temperatures and damage to the connector wire. The same precautions explained previously must be taken for equipment installed inside caves.

Some parameters must be taken into consideration when calculating infiltration rate. At first, when the laterites or cangas are dry, some of the water is absorbed by the soil. In this case, the infiltration speed is high, but this water does not reach the monitoring points inside the cave – it is retained in the soil itself. Subsequently, as rain continues, the soil becomes soaked and the water starts to reach the monitoring points inside the cave. The tendency, in this case, would be to have relatively constant flows proportional to the amount of rain. According to the literature (Quadros, 2015), basic infiltration values for clayey soils are less than 5 mm/h while for sandy soils they are greater than 30 mm/h. Below is an example of rain/infiltration monitoring.

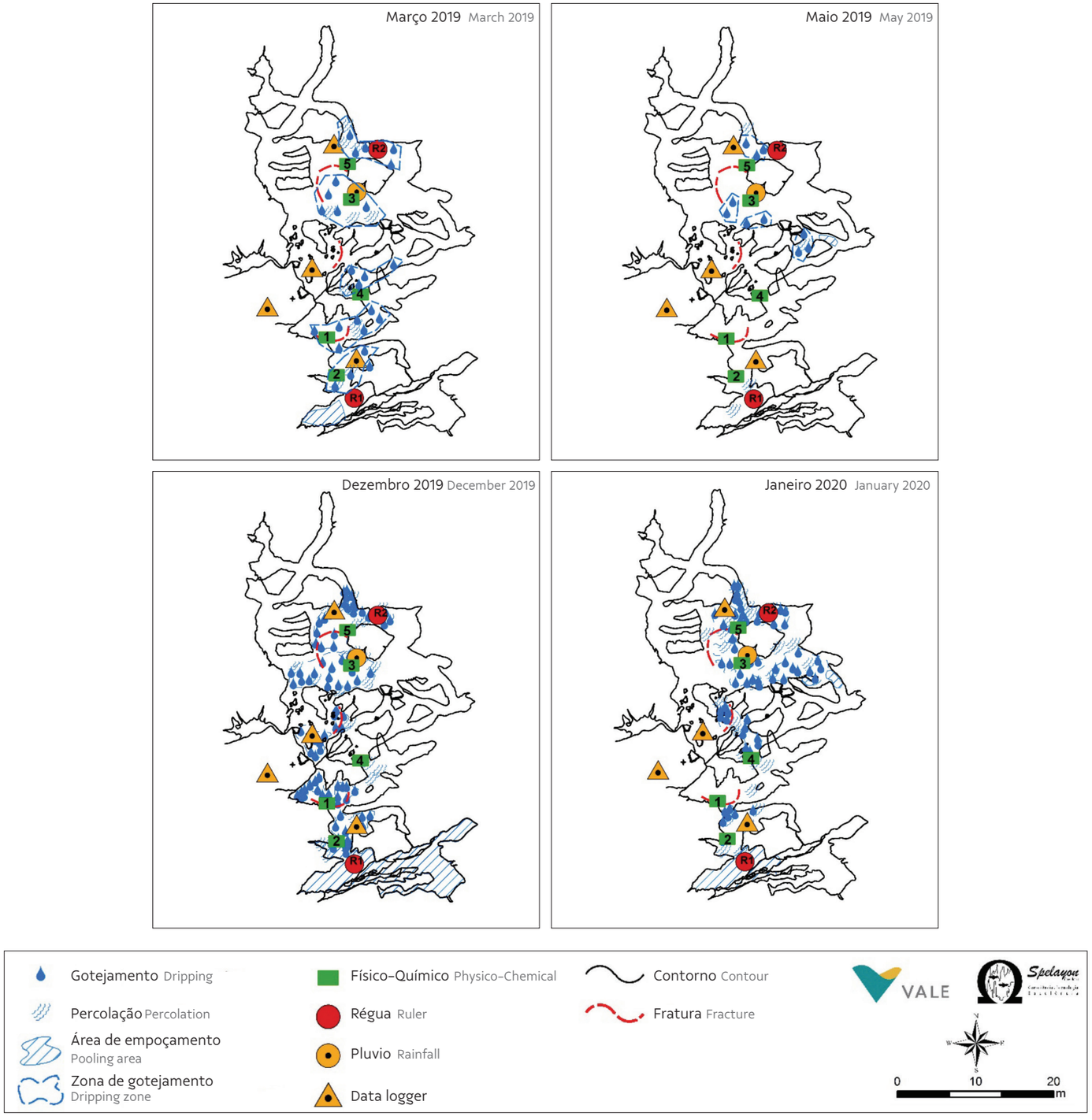


Figura 11:Evolução dos gotejamentos ao longo do ano em uma cavidade natural subterrânea em canga situada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Fonte: Vale / Spelayon.

Figure 11: Evolution of drips throughout the year in a cave in canga located in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Source: Vale / Spelayon.

Interessante observar que inicialmente esperava-se um gotejamento de pequena intensidade quando comparado à chuva externa. Esta hipótese foi refutada ao longo dos estudos, pois as águas chegam em pontos localizados no interior das cavidades naturais subterrâneas em abundância devido à concentração do fluxo em descontinuidades. Na análise dos dados concluiu-se que as cavernas recebem aporte de águas através do escoamento superficial – fluxos concentrados e pontos de acúmulo de água. Estas observações auxiliaram na diretriz para o mapeamento externo direcionado para registrar e plotar depressões e linhas de concentração de fluxos acima da projeção da cavidade natural subterrânea no terreno.

Esse comportamento reflete a própria gênese das cavidades naturais subterrâneas inseridas na formação ferrífera, nas quais, geralmente, o contato canga/hematitito corresponde a uma descontinuidade planar onde podem ocorrer fluxos concentrados que alargam pequenos condutos (canalículos) gerados por diferentes processos e/ou formas. Exemplifica-se o exposto acima com as diversas nascentes sazonais que ocorrem em solo, canga e hematitito. Estes condutos ou nascentes sazonais corresponderiam a protocavidades.

Chuvas torrenciais atingem as cavernas em menor ou maior tempo, a depender das condições do terreno e da intensidade da chuva. O gotejamento no interior da cavidade natural subterrânea decresce rapidamente com o término da chuva, mas não seca completamente. Este decréscimo indica que praticamente não há armazenamento de água e a intermitência do gotejamento deve-se, provavelmente, à presença de argilas nas fraturas que fornecem água paulatinamente quando cessam as precipitações.

Como exemplo, para uma cavidade natural subterrânea em canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, o menor tempo entre a chuva e o início do registro foi de 35 minutos (chuva intensa - 33,01mm/h); o maior valor foi de 36 horas; a mediana foi de cerca de 2h22min após o início das chuvas. A taxa de gotejamento variou de 0,71 a 16,8 mm/h com mediana de 1,78mm/h e desvio padrão de 3,33 mm/h. Quanto à duração do gotejamento após o término das chuvas, variou de cerca de 11 a 26 horas, com mediana de 20h30min. E a duração total do gotejamento no interior da caverna variou de cerca de 50 a 290 horas com mediana de 102 horas (cerca de 4 dias e 6 horas).

It is interesting to note that initially a low intensity drip was expected when compared to the external rain. However, this hypothesis was refuted throughout the studies, as the water arrives at points located inside the caves in abundance due to the concentration of the flow in discontinuities. Analyzing the data, it was concluded that the caves receive water supply through surface runoff – concentrated flows and points of water accumulation. These observations provided guidance for external mapping aimed at recording and plotting depressions and flow concentration lines above the projection of the cave in the terrain.

This behavior reflects the very genesis of caves inserted in the iron formation, in which, generally, the canga/hematitite contact corresponds to a planar discontinuity where concentrated flows can occur that widen small conduits (canaliculi) generated by different processes and/or forms. The above is exemplified by the various seasonal springs that occur in soil, canga and hematite. Such conduits or seasonal springs would correspond to protocavities.

Torrential rains reach caves in a shorter or longer time, depending on the conditions of the terrain and the intensity of the rain. Dripping inside a cave decreases rapidly as the rain stops but does not dry out completely. This decrease indicates that there is practically no water storage, and the intermittency of dripping is probably due to the presence of clay in the fractures that gradually supply water when precipitation stops.

As an example, for a cave in canga in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, the shortest time between rain and the start of recording was 35 minutes (intense rain 33.01mm/h); the highest value was 36 hours; the average was around 2h22min after the start of the rains. The drip rate ranged from 0.71 to 16.8 mm/h with a median of 1.78 mm/h and a standard deviation of 3.33 mm/h. The duration of dripping after the rains ended ranged from around 11 to 26 hours, with a median of 20h30min, while the total duration of dripping inside the cave varied from about 50 to 290 hours with a median of 102 hours (about 4 days and 6 hours).

4 TESTES COM TRAÇADORES

4.1 Traçadores Corantes

A técnica de injeção de traçadores corantes fluorescentes para a determinação de rotas de fluxo d'água subterrânea foi inicialmente desenvolvida para a aplicação em áreas cársticas, onde a relação entre pontos de infiltração da água superficial, como por exemplo os sumidouros de vales cegos e dolinas, nem sempre pode facilmente ser associada aos seus pontos de descarga correspondentes. Assim, um traçador corante que seja injetado em um determinado ponto de infiltração e, posteriormente identificado ou coletado em um ponto de descarga hipotético, é capaz de comprovar a conexão hidrológica entre esses dois pontos. No entanto, é importante destacar que a não identificação do traçador no ponto de descarga não significa que a conexão não exista, pois falhas nos testes podem ocorrer por diversas razões (Goldscheider *et al.*, 2008). Além da comprovação de conexão entre um ponto de recarga e um ponto de descarga (ensaio qualitativo), testes com traçadores podem ser utilizados para descrever características do aquífero de condutos, ou outro meio poroso em questão, tais como a velocidade de fluxo entre um ponto de recarga e descarga (teste quantitativo) (Thraikill, 1985). Para o contexto das cavernas em minério de ferro, a aplicação dessa técnica é relativamente recente, havendo ainda poucos exemplos desse tipo de estudo. Ressalta-se que o uso de traçadores corantes é comum em meios saturados e as cavidades naturais subterrâneas em ferro geralmente situam-se na zona vadosa e a infiltração é difusa, ao contrário das cavernas carbonáticas, por exemplo.

Existem diversos tipos de traçadores, como os corantes fluorescentes (ex.: rodamina, fluoresceína, eosina, amino-G, etc.), os isótopos, os sais (ex.: sódio, potássio, cloreto, etc.) e as partículas (ex.: bactérias, microesferas, etc.) (Goldscheider *et al.*, 2008). Para o contexto das cavernas em minério de ferro, vale destacar a possibilidade de utilização da própria água sem a utilização de traçador durante o período seco, uma vez que, geralmente, não há fluxo natural nesse período e injeções artificiais de água podem auxiliar na compreensão sobre a conexão entre pontos de infiltração e descarga (VALE / MDGEO, 2020).

Na maioria dos casos, as cavernas em minério de ferro estão inseridas nos interflúvios das vertentes, não havendo muitas vezes um ponto de infiltração bem definido para a injeção dos traçadores, já que não há um canal de drenagem que possa conduzir todo o fluxo de uma sub-bacia para o interior de

4 TESTS WITH TRACERS

4.1 Colored Tracers

The injection of fluorescent colored tracers technique for determining groundwater flow routes was initially developed for application in karst areas, where the relationship between surface water infiltration points, such as sinkholes in blind valleys and dolines, can not always be easily associated with their corresponding discharge points. Thus, a colored tracer that is injected at a given infiltration point and subsequently identified or collected at a hypothetical discharge point can prove the hydrological connection between the two. However, it is important to emphasize that failure to identify the tracer at the discharge point does not mean that the connection does not exist, as test failures can occur for several reasons (Goldscheider et al., 2008). In addition to proving hydraulic connection between a recharge point and a discharge point (qualitative test), tracer tests can be used to describe characteristics of the conduit aquifer or other porous medium in question, such as flow velocity between a recharge and discharge point, (quantitative test) (Thraikill, 1985). The application of this technique in the context of ferriferous caves is relatively recent, and there are still few examples of this type of study. It should be noted that the use of colored tracers is common in saturated media, and ferriferous caves are generally located in the vadose zone and infiltration is diffuse, unlike carbonate caves, for example.

There are several types of tracers, such as fluorescent dyes (e.g., rhodamine, fluorescein, eosin, amino-G, etc.), isotopes, salts (e.g., sodium, potassium, chloride, etc.) and particles (e.g., bacteria, microspheres, etc.) (Goldscheider et al., 2008). In the context of ferriferous caves, there exists the possibility of using water itself without a tracer during the dry period, since there is generally no natural flow and artificial injections of water can help to understand the connection between infiltration and discharge points (VALE / MDGEO, 2020).

In most cases, ferriferous caves are inserted in the interfluves of slopes, and there is often no well-defined infiltration point for the injection of tracers, as there is no drainage channel that can carry the entire flow of a sub-basin into a cave. This situation

uma caverna. Essa situação torna-se ainda mais complexa considerando o caráter difuso da infiltração nas vertentes, que pode ocorrer tanto sobre a rocha exposta, através de redes de fraturas muito densas em FFB ou pela porosidade da canga, quanto no solo. Um tipo de aplicação possível para contornar esse problema é a injeção de traçadores ao longo de linhas ou franjas, com espaçamento regular sobre a vertente acima das cavernas (Figura 12). Neste caso, a utilização de tipos de

becomes even more complex considering the diffuse nature of the infiltration on slopes, which can occur both via exposed rock, through networks of very dense fractures in BIF, or due to the porosity of the canga, as well as in soil. One possible type of application to overcome this problem is the injection of tracers along lines or fringes, with regular spacing on the slope above the caves (Figure 12). The use of different types of colored tracers at each distance interval can then help to identify the minimum

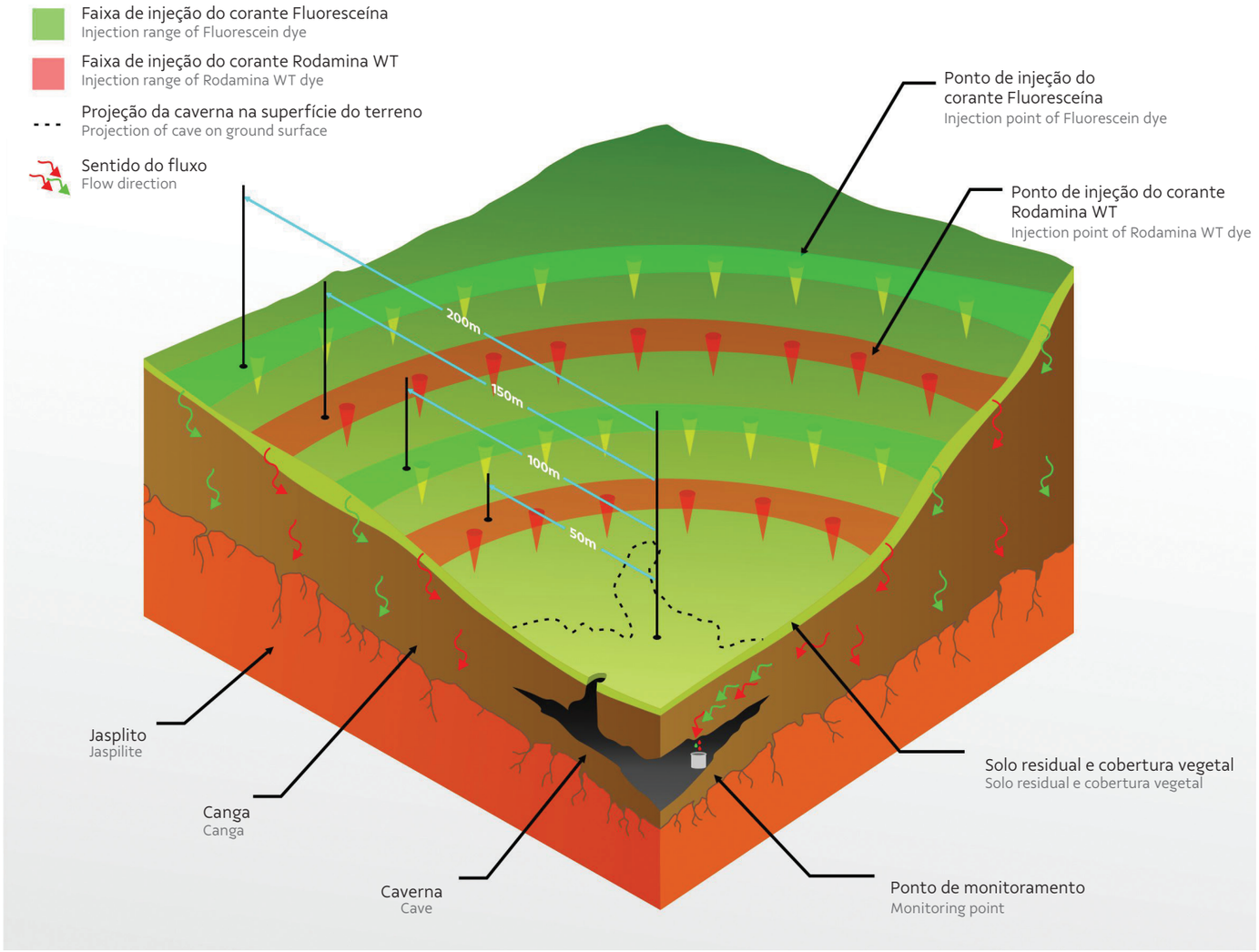


Figura 12: Modelo hipotético da distribuição das linhas ou franjas, de injeção de traçadores corantes no contexto de vertentes com área de captação associada a cavernas em minério de ferro. Extraído de VALE / Hidrovia (2017).
Figure 12: Hypothetical model of the distribution of lines or fringes, from the injection of colored tracers in the context of slopes with a catchment area associated with ferriferous caves. Extracted from VALE / Hidrovia (2017).

Porém, este método de estudo mostrou-se dispendioso e com resultados dúbios. Os traçadores corantes se deterioram com a luz solar, sendo necessário esperar as chuvas e aplicá-los durante ou imediatamente antes de eventos pluviométricos. Além disso, nestes estudos, ocorreram casos de contaminação, pois o acesso às cavidades naturais subterrâneas deve ser restrito, mas a fauna silvestre mantém seu fluxo natural na área de estudo e, portanto, pode levar o traçador corante do meio externo para o interior das cavernas avaliadas (Figura 13).

Além disso, a heterogeneidade do maciço rochoso e as distintas condições geomorfológicas produzem resultados não uniformes. Tais resultados reforçam a importância da expansão e aperfeiçoamento do projeto. Nos casos estudados, os fluxos monitorados no interior das cavidades naturais subterrâneas são oriundos da dinâmica hídrica na vertente, não estando estes fluxos associados ao nível d'água do aquífero. São parcelas da precipitação pluviométrica que percorrem os vazios do substrato ferrífero na zona vadosa da vertente e atravessam as cavidades ao longo de um certo tempo, em trechos específicos. Esse movimento tem como força motriz o gradiente topográfico e o *input* pluviométrico que incide diretamente sobre a vertente. Desse modo, sabe-se que os resultados podem ter grande variação, dependendo das condições de chuva nas quais o experimento é desenvolvido (Hidrovia, 2017).

Colored tracers deteriorate in sunlight, making it necessary to wait for rain and apply them during or immediately before rainfall events. Furthermore, these studies experienced cases of contamination, as access to caves must be restricted, yet wild fauna maintains its natural flow in study areas and can transport the colored tracer from the external environment to the interior of the evaluated caves (Figure 13).

Furthermore, rock mass heterogeneity and different geomorphological conditions produce non-uniform results. Such results reinforce the importance of expanding and improving the project. In the studied cases, the flows monitored inside caves come from the hydric dynamics on the slope, and these flows are not associated with the water level of the aquifer. Instead, they are portions of rainfall that travel through the voids in the iron substrate in the vadose zone of the slope and cross the caves over a certain period of time, in specific sections. This movement is driven by the topographic gradient and the rainfall input that falls directly on the slope. Therefore, it is known that the results can vary greatly, depending on the rain conditions in which the experiment is carried out (Hidrovia, 2017).



Figura 13: A–B) Fotos de pegadas de mamífero circulando por sobre os dispositivos de carvão, podendo ser fonte de contaminação dos traçadores. C) Data logger de temperatura e umidade instalado no interior da caverna e danificado por roedor. Fotos: A e B: Xavier Prous, C: Georgete Dutra.
Figure 13: A–B) Photos of mammal footprints circulating over the charcoal devices, which could be a source of tracer contamination. C) Temperature and humidity *data logger* installed inside the cave and damaged by a rodent. Photos: A e B: Xavier Prous, C: Georgete Dutra.

4.2 Caminho das Águas

Com a evolução do conhecimento e caracterização das cavidades naturais subterrâneas, observou-se que as cavidades em minério de ferro apresentam sazonalidade, isto é, na estiagem a atividade hídrica fica suspensa, os gotejamentos cessam ou praticamente cessam, muitas poças de água diminuem de nível e/ou secam. Nas chuvas as águas retornam às cavidades na forma de gotejamentos, percolação, drenagem, etc.

Dessa forma, a própria água pode ser utilizada como traçador nas cavernas que possuem sazonalidade. Em estudos realizados em Serra Sul, na Serra dos Carajás, estado do Pará (norte do Brasil), utilizou-se a água como traçador no período de estiagem (Figura 14). Como experimento, nessa ocasião, despejou-se água a partir da caverna em direção a montante. Para registrar a presença da água foram inseridos pluviógrafos nos pontos de gotejamento, que indicaram precisamente o horário de chegada das águas no interior da cavidade natural subterrânea avaliada.

Os ensaios de injeção de água foram realizados durante o período seco, pois não há interferência do escoamento, possibilitando assim a avaliação da conectividade de estruturas superficiais (talvegues secos, depressões localizadas, região de alagado sazonal, zonas de fraqueza com pequenos abatimentos de rocha e afloramentos rochosos) com a cavidade natural subterrânea, uma vez que toda a água verificada na cavidade estudada poderia ser diretamente relacionada com os ensaios realizados na superfície.

4.2 Water Route

The evolution of knowledge and the characterization of caves has revealed that ferriferous caves present seasonality. During the dry season, water activity is suspended, dripping ceases or practically ceases, and many pools of water decrease in level and/or dry out. During rain, water returns to the caves in the form of drips, percolation, drainage, etc.

In this way, the water itself can be used as a tracer in caves that have seasonality. Water was used as a tracer during the dry period in studies carried out in Serra Sul, Serra dos Carajás, state of Pará (North Brazil), (Figure 14). As an experiment, on this occasion, water movement was poured from the cave towards upstream. To record the presence of water, rain gauges were inserted at the drip points, which precisely indicated the time of the arrival of water inside the evaluated cave.

The water injection tests were carried out during the dry period, as there is no flow interference, thus enabling the assessment of the connectivity of surface structures (dry thalwegs, localized depressions, seasonal flooded regions, areas of weakness with small rock depressions and rocky outcrops) with the cave, since all the water documented in the studied cavity could be directly related to the tests carried out on the surface.



Figura 14: A) Mangueira sendo esticada para pontos mais próximos à cavidade natural subterrânea. B) Caminhão pipa e mangueira posicionados para a injeção de água. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 14:A) Hose being stretched to points closer to the cave. B) Water truck and hose positioned for water injection. Photos: Georgete Dutra.

A partir desses ensaios, é possível mapear as principais zonas superficiais conectadas com porções definidas da cavidade natural subterrânea, auxiliando a avaliação da interferência do escoamento nos fluxos de água na cavidade.

O experimento iniciou despejando água a 50m da caverna e observando a chegada da mesma na cavidade (Figura 15). A vantagem deste método é que pode ser quantificada a água despejada, quanto atinge a cavidade e o tempo para que ela percorra o ponto de despejo até o registro da presença dela na cavidade.

No dia seguinte, após cessado os gotejamentos da primeira injeção, foi realizado de forma similar o despejo na faixa dos 100m e assim por diante (150m; 200m, 250m, etc), sempre observando onde a água infiltrava no caminho, permitindo, assim, identificar os "sumidouros" na drenagem.

Ao compilar as informações dos testes de injeção, observou-se que nas estruturas de drenagem a uma distância superior a 50m, o tempo de trânsito é superior às estruturas e condutos presentes no caminho da drenagem sobre a região da cavidade natural subterrânea. Estas estruturas sobre a região da caverna proporcionam a infiltração quase que imediata.

Outro ponto importante nos testes de injeção de água mostra que, de forma geral, os pontos de injeção apresentaram rápida resposta de trânsito, sendo entre 2 e 23 minutos. Este resultado é condizente com estudos de tempo de infiltração realizados através de pluviógrafos no período chuvoso, conforme será detalhado mais adiante.

These tests make it possible to map the main surface zones connected with defined portions of the cave, which helps to evaluate the interference of runoff with water flows in the cave.

The experiment began by pouring water 50m from the cave and observing its arrival therein (Figure 15). The advantage of this method is that the discharged water can be quantified, as can the amount that reaches the cave, as well as the amount of time it takes to travel from the discharge point until its presence in the cave.

The following day, after the drips from the first injection had stopped, the pouring was carried out in a similar way at the 100m range, and so on (150m; 200m, 250m, etc.), always observing where the water infiltrated along the way, thus allowing the identification of "sinks" in the drainage.

The compilation of information from injection tests revealed that the transit time is longer in drainage structures at a distance greater than 50m than in structures and conduits present in the drainage path over the cave region, the latter providing almost immediate infiltration.

Another important finding of the water injection tests was that, in general, the injection points showed a quick transit response, between 2 and 23 minutes. This result is consistent with studies of infiltration time carried out using pluviographs during the rainy season, as will be detailed later.

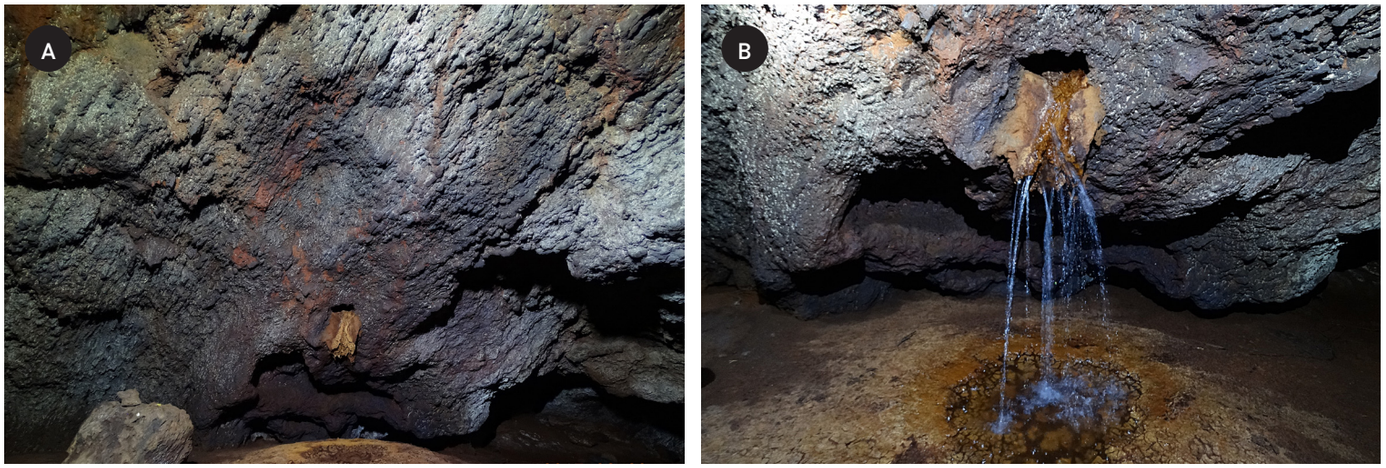


Figura 15: A) Ponto de gotejamento no Salão 2 da cavidade natural subterrânea sem a presença de água. B) Ponto de gotejamento após a injeção de água no Ponto 01 (50 metros da cavidade). Fotos: Georgete Dutra.

Figure 15: Drip point in Hall 2 of a cave without the presence of water. B) Drip point after water injection at Point 01 (50 meters from cave). Photos: Georgete Dutra.

5 MONITORAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DAS ÁGUAS

De acordo com a hidrogeologia clássica, as águas subsuperficiais formam três zonas hídricas distintas: a zona das raízes ou de solo; a zona vadosa ou intermediária ou zona não saturada; e a zona saturada ou da água de percolação (Heath, 1983). Separando a zona insaturada da zona saturada tem-se a franja capilar, como pode ser vista na Figura 16.

Deve-se considerar que as águas dessas zonas estão ligadas pelos processos hidrológicos de recarga e transporte, assim como pelos mecanismos hidroquímicos e biogeoquímicos de transformação da qualidade. No ciclo hidrológico, a zona não saturada representa um elo entre as águas das chuvas subterrâneas e superficiais. As cavidades naturais subterrâneas associadas à formação ferrífera, em geral, estão na zona não saturada e algumas estão ainda na zona de solo (canga/saprolito), fato indicado pela presença de diversas raízes no teto e nas paredes das cavernas.

Na zona não saturada coexistem três fases: o material sólido poroso de origem geológica ou orgânica; a fase líquida representada pela água e seus solutos; e a fase gasosa constituída pelo ar, vapor d'água, N_2, CO_2, O_2 e, em menores quantidades, NH_3 e N_2O.

Na zona não saturada, o fluxo de água geralmente é lento em condições aeróbica e alcalina. Em climas tropicais, na época da seca, o movimento da água é ascendente, promovendo a precipitação de sais (evaporação), e no regime das chuvas predomina o movimento descendente, facilitando a lixiviação dos produtos da superfície (infiltração). Os ânions, como Cl^-, SO_4^{-2} e NO^{-3} são facilmente lixiviados. Os cátions se encontram, em geral, na forma de sais solúveis, e sua lixiviação não somente requer meio ácido, como depende da quantidade de íons disponíveis e da força das ligações dos seus compostos.

Uma vez escolhida a cavidade natural subterrânea a ser monitorada, tem-se a instalação de uma rede de monitoramento definida, segundo os objetivos a serem atingidos. Desta forma, pode-se inicialmente estipular uma rede qualiquantitativa que permita determinar a quantidade de água que entra e sai no sistema envolvendo a coleta de dados de pluviometria, de vazão e de físico-química básica.

Na rede de monitoramento há a definição de pontos de amostragem (coleta). As amostragens devem seguir os procedimentos para determinação de parâmetros de campo, coleta e preservação, identificação local e análise do entorno. Deve-se ainda estudar as opções para o envio das amostras,

5 PHYSICO-CHEMICAL MONITORING OF WATER

According to classical hydrogeology, subsurface waters form three distinct water zones: the root or soil zone; the vadose or intermediate zone or unsaturated zone; and the saturated or percolation water zone (Heath, 1983). Separating the unsaturated zone from the saturated zone is the capillary fringe, as can be seen in Figure 16.

It must be considered that the waters in these areas are linked by hydrological processes of recharge and transport, as well as by hydrochemical and biogeochemical mechanisms of quality transformation. In the hydrological cycle, the unsaturated zone represents a link between groundwater and surface rainwater. Caves associated with the iron formations are generally in the unsaturated zone and some are even in the soil zone (canga/saprolite), as indicated by the presence of several roots in the ceiling and walls of caves.

Three phases coexist in the unsaturated zone: solid porous material of geological or organic origin; the liquid phase represented by water and its solutes; and the gas phase consisting of air, water vapor, N_2, CO_2, O_2 and, in smaller quantities, NH_3 and N_2O.

Water flow in the unsaturated zone is generally slow and under aerobic and alkaline conditions. In tropical climates, during the dry season, water movement is upward, promoting the precipitation of salts (evaporation), while during the rainy season, downward movement predominates, facilitating the leaching of products from the surface (infiltration). Anions such as Cl^-, SO_4^{-2} and NO^{-3} are easily leached. Cations are generally found in the form of soluble salts, and their leaching not only requires an acidic environment, but also depends on the amount of available ions and the strength of the bonds between their compounds.

Once the cave to be monitored has been chosen, a defined monitoring network is installed, according to the objectives to be achieved. In this way, it is possible to initially stipulate a qualitative and quantitative network that allows determining the amount of water that enters and leaves the system, involving the collection of rainfall, flow and basic physico-chemical data.

Sampling (collection) points are defined in the monitoring network. Water sample must be identified with local and nearby analysis; field samples must follow procedures in accordance with ANA standard. Options for sending samples, available structures,

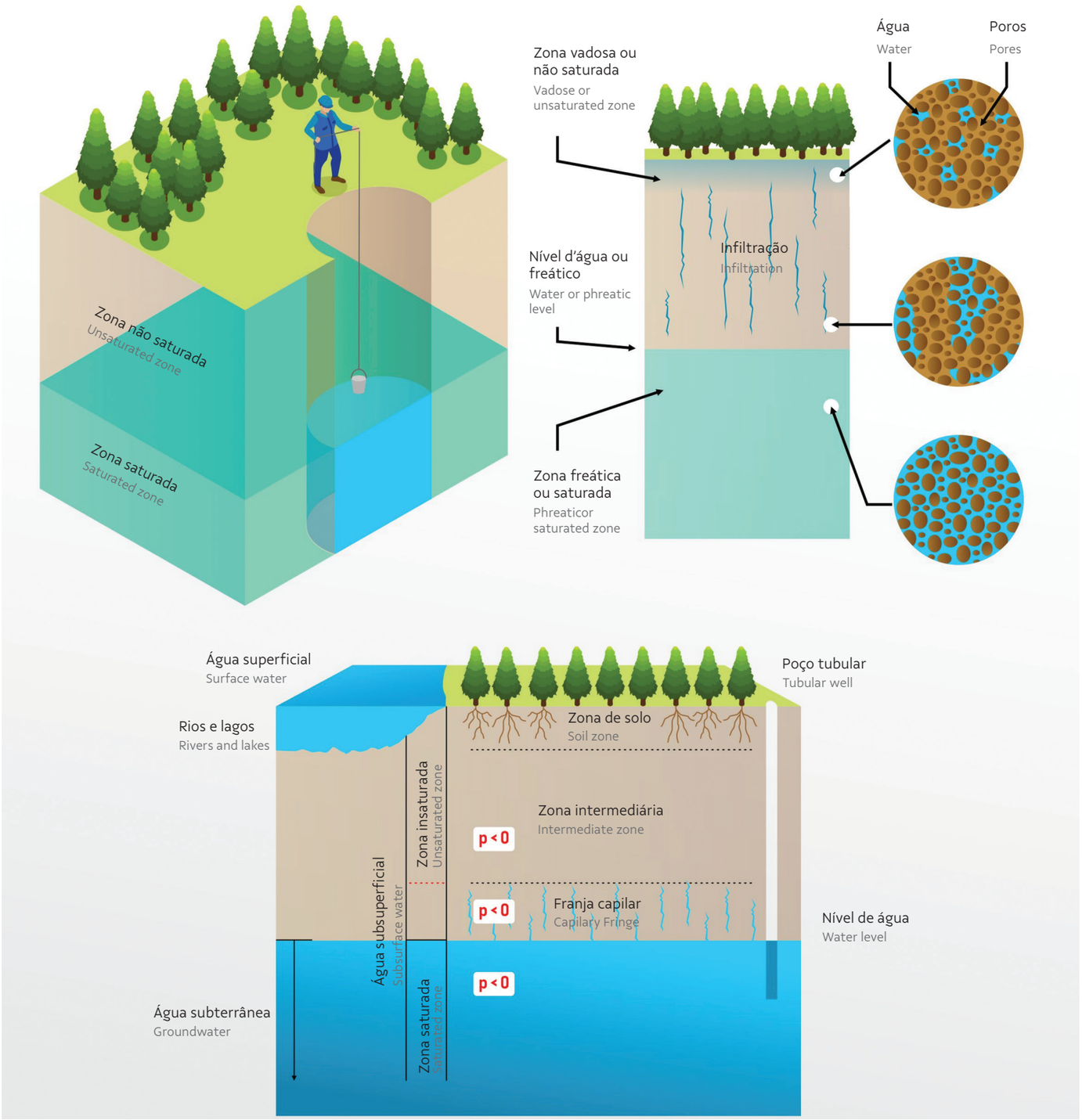


Figura 16: Distribuição da água no subsolo. Fonte: Teixeira *et al.* (2001) e Heath (1983).
Figure 16: Underground distribution of water. Source: Teixeira *et al.* (2001) and Heath (1983).

das estruturas disponíveis, dos laboratórios adequados (ISO). A manutenção da rede de monitoramento também é essencial.

Os parâmetros físico-químicos, considerados básicos em águas relacionadas a cavernas associadas à formação ferrífera, envolvem pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e permitem identificar alterações vinculadas a ações antrópicas, configurando um alerta para a tomada de decisões. Estes parâmetros podem ser medidos por qualquer sonda de qualidade de água (Figura 17), desde que observados padrões de precisão, confiabilidade e correta manutenção.

Uma das diferentes formas para amostragem físico-química das águas é a utilização de copos plásticos para coleta de águas que podem ser deixados entre uma amostragem e outra ou em recipientes para leitura imediata. De forma geral, os parâmetros escolhidos são:

- **pH** – potencial hidrogeniônico: parâmetro que mostra a reatividade do íon H^+ com resultados indicando acidez (pH de 0 a <7), neutralidade (pH = 7) ou alcalinidade (pH de >7 a 14). É uma grandeza adimensional. Geralmente nos itabiritos o pH varia em torno de 5; nos itabiritos fácies carbonáticas podem ser encontrados valores maiores como 6 a 8.
- **CE** – condutividade elétrica: é a capacidade de uma solução conduzir corrente elétrica, sendo diretamente relacionada aos sólidos totais dissolvidos (STD). As unidades utilizadas são micro Siemens (mS/cm) ou milisiemens (mS/cm). Geralmente nos itabiritos a CE é reduzida, com valores inferiores a 100 mS/cm; para itabiritos fácies carbonática,

and appropriate laboratories (ISO) must also be investigated. Maintaining the monitoring network is also essential.

The physico-chemical parameters considered basic in waters related to caves associated with iron formations involve pH, electrical conductivity and total dissolved solids. These parameters also allow the identification of changes linked to human actions, configuring an alert for decision making. They can be measured by any water quality probe (Figure 17), as long as standards of accuracy, reliability and correct maintenance are observed.

One method for the physico-chemical sampling of water is leave the glasses in the cave floor to the water falls in drops. The glasses remain in the cave taking time to fill it with water. So, it's possible to read the parameters. In general, the parameters chosen are:

- **pH** – hydrogen ionic potential: a parameter that shows the reactivity of the H^+ ion with results indicating acidity (pH from 0 to <7), neutrality (pH = 7) or alkalinity (pH from >7 to 14). It is a dimensionless quantity. Generally, the pH in itabirites varies around 5; while itabirites facies carbonate have higher values such as 6 to 8.
- **EC** – electrical conductivity: the ability of a solution conduct electrical current, being directly related to total dissolved solids (TDS). The units used are micro-Siemens (mS/cm) or millisiemens (mS/cm). Generally, EC is reduced in itabirites, with values below 100 mS/cm, and may be higher

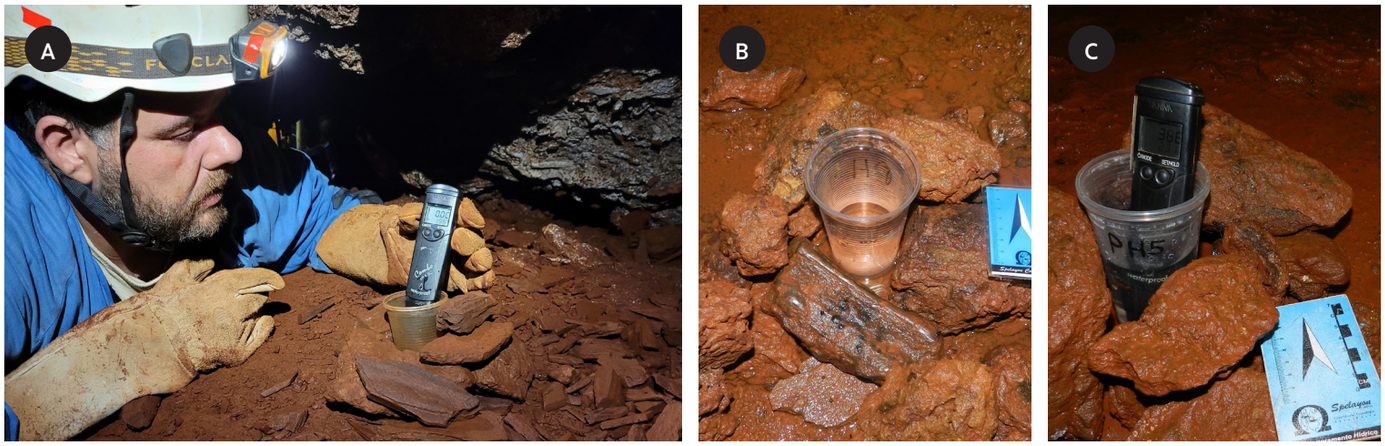


Figura 17: A) Medições de parâmetros físico-químicos in situ; B-C) Uso de copos descartáveis para coleta de água. Fotos: Spelayon.
Figure 17: A) Measurements of physicochemical parameters in situ; B-C) Use of disposable cups to collect water. Photos: Spelayon.

estes valores podem ser superiores. Este parâmetro pode ajudar a diferenciar o tipo de rocha.

- **STD** – sólidos totais dissolvidos: é a somatória da concentração de todos os íons livres de todos os elementos dissolvidos na água. Sua unidade é mg/L. Geralmente nos itabiritos a CE é reduzida, com valores inferiores a 100 mg/L; para itabiritos fácies carbonática estes valores podem ser superiores.
- **T** – Temperatura: mede-se a temperatura tanto do ar quanto das águas. Este parâmetro serve para correção de outras variáveis, pois muitas relacionam-se diretamente com a temperatura. É expressa em graus ^{0}C.
- **Eh** – reações de oxidação-redução ou "redox": este parâmetro caracteriza o estado de oxidação-redução nas águas. A unidade é milivolts – mV. Ocorre redução (valores negativos) quando há consumo de oxigênio, e oxidação (valores positivos) quando há íons de cobre ou ferro e não há consumo de oxigênio. São comuns valores entre -500 a +700 mV.

Os parâmetros acima são medidos *in situ* diretamente nas águas obtidas no interior das cavidades naturais subterrâneas e em seus arredores. Para análises mais completas, realiza-se coletas de águas (amostras) para envio a laboratórios. Ressalte-se que devem ser seguidos os procedimentos para coleta de águas superficiais dispostos no "Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras" (CETESB, 2018). Finalizado o trabalho de determinação dos parâmetros físico-químicos nos pontos de monitoramento, as sondas devem ser lavadas com água deionizada para evitar contaminação na próxima medição.

O plano de monitoramento das águas nas cavidades naturais subterrâneas irá depender dos objetivos a serem alcançados. A amostragem anterior a qualquer alteração antrópica fornece um panorama das condições naturais; porém ressalte-se que os parâmetros, mesmo em condições naturais, são variáveis, a depender da época de amostragem: **na seca ou estiagem:** geralmente com maior concentração de elementos; **no início das chuvas**: geralmente valores maiores dos parâmetros, pois ocorre uma lixiviação dos componentes; **no meio e final das chuvas:** geralmente valores próximos dos valores encontrados nas águas pluviométricas.

Uma boa recomendação é a realização de amostragens em pelo menos um ponto externo à caverna, pontos internos e um ponto com coleta de águas de chuva (Figura 18). Estes pontos permitirão

for carbonate facies itabirites. This parameter can help differentiate the type of rock

- **TDS** –total dissolved solids: the sum of the concentration of all free ions of all elements dissolved in water. Its unit is mg/L. Generally, EC is reduced in itabirites, with values below 100 mS/cm, and may be higher for itabirites facies carbonate.
- **T** – temperature: the temperature of both air and water is important. This parameter serves to correct other variables, as many are directly related to temperature. It is expressed in degrees ^{0}C.
- **Eh** – oxidation-reduction reactions or "redox": this parameter characterizes the oxidation-reduction state in water. The unit is millivolts – mV. Reduction (negative values) occurs when there is oxygen consumption, and oxidation (positive values) when there are copper or iron ions and no oxygen consumption. Values between -500 to +700 mV are common.

The above parameters are measured *in situ* directly in water obtained inside caves and from their surroundings. For more complete analyses, water (samples) can be collected and sent to laboratories. The procedures for collecting surface water set out in the "Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras" (ANA/CETESB, 2018) must be followed. Once the work of determining the physico-chemical parameters at the monitoring points has been completed, the probes must be washed with deionized water to avoid contaminating the next measurement.

The plan for water monitoring in caves will depend on the objectives to be achieved. Sampling prior to any anthropogenic change provides an overview of natural conditions; however, it should be noted that the parameters, even in natural conditions, are variable, depending on the sampling period: **in dryness or drought**, there are generally higher concentrations of elements; **at the beginning of the rains** there are generally higher values of the parameters, as the components are leached; and **in the middle and end of the rains** the values are generally close to those found in rainwater itself.

A good recommendation is to sample at least one point external to the cave, internal points, and a point for rainwater collection (Figure 18). These points will allow the

avaliar as inter-relações entre os parâmetros e sua variação. Além destes pontos, é importante preparar e enviar aos laboratórios duplicatas e amostras "branco" (água deionizada) para averiguar resultados irreais e/ou contaminações ou erros de análise.

Para a coleta de água em cavernas e no seu entorno, deve-se estar atento às condições do ambiente com observação de pontos de vulnerabilidade ou de contribuição para a modificação das características das águas. Uma ficha deve ser elaborada contendo a descrição dos pontos de coleta, condições meteorológicas e ambientais, observações sobre a paisagem, vegetação e, no caso de interior das cavernas, observações sobre o estado do ponto de coleta, ou seja, se é água de circulação ou água parada, estimativa de vazão, descrição da localização, plotagem no mapa do ponto de coleta, etc.

6 OUTROS MÉTODOS DE ANÁLISE HIDROLÓGICA

Para uma análise completa do sistema hidrológico associado a uma área ou bacia de captação, é possível quantificar outros parâmetros importantes para a análise do balanço hídrico ou para descrever o fluxo da água na zona vadosa e na zona freática. No entanto, no contexto de cavernas em minério de ferro, a obtenção desses dados pode ser muito difícil, ou até mesmo não ter uma aplicação.

O monitoramento do nível d'água subterrânea ou nível piezométrico, geralmente medido em poços, apesar de ser

interrelationships between the parameters and their variation to be evaluated. In addition to these points, it is important to prepare and send duplicates and "blank" samples (deionized water) to the laboratories to check for unrealistic results and/or contamination or analysis errors.

Environmental conditions must be taken into account when collecting water in caves and from their surroundings, observing points of vulnerability or contributions to the modification of water characteristics. A form must be prepared containing a description of the collection points, meteorological and environmental conditions, observations about the landscape and vegetation, and, in the case of cave interiors, observations on the state of the collection point, that is, whether water is circulating or stagnant, flow estimate, description of the location, plotting on the map of the collection points, etc.

6 OTHER METHODS OF HYDROLOGICAL ANALYSIS

For a complete analysis of the hydrological system associated with an area or catchment basin, there are other important parameters for water balance analysis or to describe water flow in the vadose zone and phreatic zone to be quantified. However, obtaining these data may be very difficult, or even have no application, in the context of ferriferous caves.

Monitoring the groundwater level or piezometric level, generally measured in wells, despite being extremely important

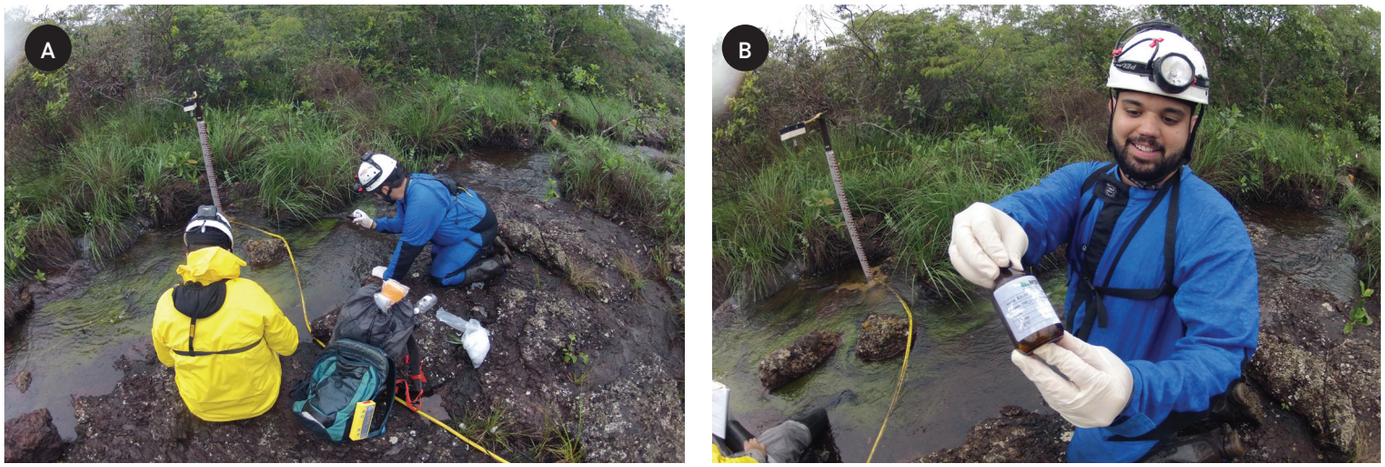


Figura 18: A) Coleta de água para análise isotópica em ponto externo à cavidade natural subterrânea; B) Recipiente com identificação do ponto. Fotos: A: Georgete Dutra, B: Spelayon.
Figure 18: A) Water collection for isotopic analysis at a point external to the cave.; B) Container with point identification. Photos: A: Georgete Dutra, B: Spelayon.

extremamente importante no contexto da maioria dos estudos hidrogeológicos, não possui uma aplicação muito significativa para o entendimento da dinâmica hidrológica associada a cavernas em minério de ferro, já que elas estão inseridas na zona vadosa. O inventário e cadastramento das nascentes e outros pontos naturais de acesso direto à água subterrânea, no entorno próximo das cavernas em minério de ferro, normalmente já é suficiente para determinar, com grau de precisão relativamente satisfatório, a posição do nível d'água subterrânea em relação à cota das cavernas.

A seguir, serão apenas citados alguns desses parâmetros e seus respectivos métodos de análise, assim como as limitações associadas ao contexto do estudo de cavernas em minério de ferro.

6.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um importante parâmetro do balanço hídrico e pode ser determinada, por exemplo, por meio da utilização de fórmulas empíricas e dados obtidos a partir de tanques de evaporação. Esse tipo de dado nem sempre é disponibilizado pelas estações de monitoramento meteorológico, o que pode dificultar a sua utilização. Os lisímetros, instrumentos instalados em trincheiras com profundidades de cerca de 2 a 3m do solo, podem ser utilizados para a medição da infiltração real em uma área pequena. Estes instrumentos também podem ser utilizados para mensurar a evapotranspiração em uma área com terreno plano, onde o escoamento superficial é desprezível, através da relação (Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008):

$$ETR=P-I$$

Onde ETR é a evapotranspiração, P a precipitação e I a infiltração. Porém, esse tipo de análise não é aplicada com frequência e fornece um dado de representatividade local, sendo que para áreas na escala de uma bacia ou sub-bacia, diversos lisímetros devem ser instalados para uma representatividade estatística dos dados (Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008).

6.2 Réguas Linimétricas

As réguas linimétricas, como mencionado anteriormente, auxiliam na medição de vazão através da determinação da curva-chave, mas também podem ser utilizadas no monitoramento para determinar a altura da lâmina d'água, como controle da quantidade de água e determinar, para um local ou ponto, a variação sazonal do nível de água (quantidade).

in the context of most hydrogeological studies, does not have a very significant application for understanding the hydrological dynamics associated with ferriferous caves since they are inserted in the vadose zone. The inventory and registration of springs and other natural points of direct access to groundwater, in the immediate surroundings of ferriferous caves, is normally sufficient to determine, with a relatively satisfactory degree of precision, the position of the groundwater level in relation to the elevation of caves.

Only some of these parameters and their respective methods of analysis are mentioned below, as well as the limitations associated with the context of studying ferriferous caves.

6.1 Evapotranspiration

Evapotranspiration is an important water balance parameter that can be determined, for example, through the use of empirical formulas and data obtained from evaporation tanks. This type of data is not always made available by meteorological monitoring stations, which can make its use difficult. Lysimeters — instruments installed in trenches with depths of around 2 to 3 m — can be used to measure real infiltration in a small area. These instruments can also be used to measure evapotranspiration in an area with flat terrain, where surface runoff is negligible, through the following relationship (Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008):

$$ETR=P-I$$

Where ETR is evapotranspiration, P is precipitation, and I is infiltration. However, this type of analysis is not frequently applied and provides only locally representative data. Furthermore, several lysimeters must be installed for statistical representation of data for areas on the scale of a basin or sub-basin (Feitosa, E.; Feitosa, F., 2008).

6.2 Linimetric Rulers

Linimetric rulers, as mentioned previously, help in measuring flow by determining the key curve. They can also be used in monitoring to determine water depth, to control the amount of water, and to determine, for a location or point, seasonal variation in water level (quantity).

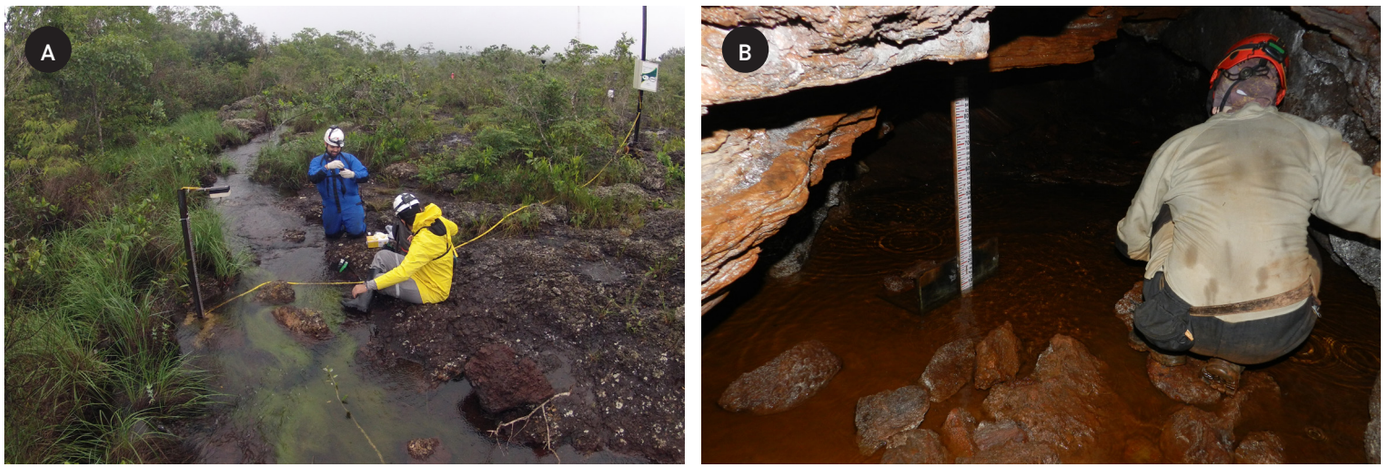


Figura 19: Réguas linimétricas para controle da vazão de uma drenagem. Este sistema instalado automatizado (à direita) permite o armazenamento das informações onde a fonte de energia é obtida por meio de placa solar e bateria (à esquerda). Fotos: Georgete Dutra.
Figure 19: Linimetric rulers to measure the flow of a drainage. This automated installed system (on the right) allows the storage of information where energy is obtained through a solar panel and battery (on the left). Photos: Georgete Dutra.

Uma régua linimétrica é uma escala graduada, podendo ser de madeira, alumínio, fibra de vidro ou PVC (Figura 19). Quando a variação dos níveis de água é considerável, é usual instalar, para facilitar a leitura, réguas escalonadas.

Para a instalação da régua linimétrica, deve-se procurar um trecho de drenagem com inclinação suave a plana, retilíneo e com fluxo laminar ou não turbulento. A régua deve estar perpendicular ao eixo da drenagem.

Geralmente, a precisão segue a regra de que as marcações devem ser no mínimo dez vezes a lâmina d'água considerando a mediana. Assim, uma drenagem com mediana de 10cm de lâmina d'água deve ter pelo menos 10 divisões. Em casos de drenagens temporárias, como em muitas associadas a cavidades em ferro, esta regra não se aplica. Utiliza-se uma régua que consiga medir centímetros para o início das chuvas e que pode ser usada até o final da época chuvosa (a depender da calha da drenagem).

No interior das cavidades naturais subterrâneas, quando a régua for utilizada simplesmente para acompanhar alagamentos sazonais (Figura 20), deve-se escolher pontos de fácil acesso, por motivos de segurança, e garantir que ela esteja nivelada. Preferencialmente, escolhe-se réguas de alumínio, embora as de fibra de vidro ou PVC também possam ser utilizadas. Em alguns casos, a fauna local pode danificar estas réguas.

A linimetric ruler has a graduated scale and can be made of wood, aluminum, fiberglass or PVC (Figure 19). When there is considerable variation in water level, stepped rulers are usually installed to facilitate reading.

A linimetric ruler should be installed in a straight drainage section with a gentle to flat slope and laminar or non-turbulent flow. The ruler must be perpendicular to the drainage axis.

Precision generally follows the rule that markings must be at least ten times the water depth considering the median. Thus, a drainage with a median water depth of 10cm must have at least 10 divisions. In cases of temporary drainage, as in many cases associated with ferriferous caves, this rule does not apply. Use a ruler that can measure centimeters for the start of the rain and that can be used until the end of the rainy season (depending on the drainage channel).

In the interior of caves, when the ruler is used simply to monitor seasonal flooding (Figure 20), points must be chosen that are easily accessible, for safety reasons, and that ensure it is level. Aluminum rulers are preferred, although those of fiberglass or PVC can also be used. In some cases, local fauna can damage these rulers.



Figura 20: Réguas linimétricas para controle da variação da quantidade de água. A) exemplo de régua instalada em época de estiagem. As outras imagens mostram o mesmo local na cavidade em períodos diferentes: B) início das chuvas, C) após chuva intensa, D) estigem. Fotos: Spelayon.
Figure 20: Linimetric rulers to measure variation in the amount of water. A) example of a ruler installed during drought. The other images show the same location in the cave at different periods: B) beginning of rain, C) after intense rain, D) the dry season. Photos: Spelayon.

6.3 Isótopos

A ciência nuclear vem desenvolvendo um conjunto de ferramentas analíticas cujos resultados têm contribuído para um melhor entendimento das águas subterrâneas e suas relações com o ciclo hidrológico e que subsidiam o manejo adequado dos recursos hídricos.

Essas técnicas nucleares empregam traçadores naturais, por meio da análise de isótopos[3] de elementos químicos presentes naturalmente na água, ou mesmo pela adição de traçadores

6.3 Isotopes

Nuclear science has been developing a set of analytical tools whose results have contributed to a better understanding of groundwater and its relationships with the hydrological cycle, as well as support the appropriate management of water resources.

These nuclear techniques employ natural tracers through the analysis of isotopes[3] of chemical elements naturally present in water, or even through the addition of colored tracers (artificial

3 Isótopos são nuclídeos com o mesmo número de prótons e diferentes números de massa. Isos = igual; *topos* = lugar, na tabela de elementos químicos (FEITOSA *et al.*, 2008).
3 Isotopes are nuclides with the same number of protons but different mass numbers. Isos = equal; topos = place, in the table of chemical elements (FEITOSA et al., 2008). (FEITOSA et al., 2008).

corantes (traçadores artificiais) ao sistema hídrico e que proporcionam a obtenção de diversos parâmetros relacionados à dinâmica dos fluxos de água no meio ambiente. Essas técnicas vêm sendo utilizadas em conjunto com as técnicas tradicionais não nucleares, para a caracterização hidrológica, na qual são particularmente eficientes.

As propriedades que caracterizam os diferentes elementos químicos são determinadas pelo número de prótons que o núcleo atômico contém, sendo que um determinado elemento químico contém um determinado número de prótons. Entretanto, o número de nêutrons pode ser variável. Os átomos com o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons são denominados isótopos. Como exemplo, podemos citar o Hidrogênio que se apresenta em três formas isotópicas distintas, com nomes especiais, sendo: $^{1}H_{1}$ o Hidrogênio simplesmente, $^{2}H_{1}$ ou D o deutério, e $^{3}H_{1}$ ou T o trítio, além dos isótopos de Oxigênio ^{18}O; isótopos de Carbono: ^{13}C e ^{14}C.

A partir da combinação destes isótopos (hidrogênio e oxigênio) podemos ter 18 moléculas de água isotopicamente diferentes, mas teremos as combinações mais importantes e frequentemente aplicadas em estudos hidrogeológicos, além da $H_2{}^{16}O$, são $HD^{16}O$ e $H_2{}^{18}O$.

Todas as moléculas de água possíveis, a partir das combinações dos isótopos de hidrogênio e oxigênio, têm propriedades físicas e químicas muito parecidas e pode-se admitir que seus comportamentos mediante os processos naturais sejam quase idênticos. Entretanto, as pequenas diferenças de pressão de vapor, mobilidade iônica, difusividade, peso atômico etc., fazem com que a água natural, segundo sua origem e forma de intervenção no ciclo hidrológico, apresente ligeiras diferenças em sua composição isotópica, que são de grande interesse em águas infiltradas e águas subterrâneas.

Os isótopos da água foram classificados em estáveis e radioativos. A principal utilidade dos isótopos radioativos (T no caso da molécula de água) é o cálculo da "idade" da água (tempo decorrido desde a infiltração), enquanto os isótopos estáveis (D e O-18) são utilizados para conhecer as fontes de recarga (origem da água) ou os processos responsáveis pela modificação da composição da água desde quando ela se infiltrou.

Geralmente, utiliza-se pontos para análise isotópica de modo a comparar e analisar as águas provenientes da chuva, do escoamento superficial e as que infiltram dentro da cavidade.

As amostras devem ser coletadas, manipuladas, acondicionadas e transportadas de acordo com os procedimentos

tracers) to the water system, that allow various parameters related to the dynamics of water flows in the environment to be obtained. These techniques have been used in conjunction with traditional non-nuclear techniques for hydrological

The properties that characterize the different chemical elements are determined by the number of protons that the atomic nucleus contains, with a given chemical element containing a certain number of protons. However, the number of neutrons can be variable. Atoms with the same number of protons and different numbers of neutrons are called isotopes. An example is Hydrogen, which comes in three distinct isotopic forms, with special names, being: $^{1}H1$ simply Hydrogen, $^{2}H_{1}$ or D is deuterium, and $^{3}H_{1}$ or T is tritium, in addition to the isotopes of Oxygen are ^{18}O; isotopes de Carbon ^{13}C and ^{14}C.

From the combination of these isotopes (hydrogen and oxygen) there are 18 isotopically different water molecules, but the most important and frequently applied in hydrogeological studies, in addition to the $H_2{}^{16}O$, are $HD^{16}O$ and $H_2{}^{18}O$.

All possible water molecules, based on combinations of hydrogen and oxygen isotopes, have very similar physical and chemical properties and it can be assumed that their behavior through natural processes is almost identical. However, small differences in vapor pressure, ionic mobility, diffusivity, atomic weight, etc., mean that natural water, depending on its origin and form of intervention in the hydrological cycle, presents slight differences in its isotopic composition, which are of great interest in infiltrated water and groundwater.

Water isotopes are classified as stable and radioactive. The main use of radioactive isotopes (T in the case of the water molecule) is to calculate the "age" of water (time since infiltration), while stable isotopes (D and O-18) are used to determine the sources of recharge (origin of water) or the processes responsible for modifying the composition of water since its infiltration.

Generally, collection points are used for isotopic analysis in order to compare and analyze water from rain, surface runoff and water that infiltrates inside the cave.

Samples must be collected, handled, packaged and transported in accordance with the procedures specified in

especificados na Norma ABNT NBR 9898 de 1987 (CETESB; ANA, 2011), além de procedimentos técnicos e de saúde e segurança ocupacional, de forma a evitar acidentes, como demonstrado na Figura 21. Como exemplo de resultados tem-se a Figura 22.

Para analisar a Figura 22 vale ressaltar a localização de cada um dos pontos em relação a uma cavidade natural subterrânea. O Pluv-01 localiza-se em uma área externa e, portanto, trata-se de água de chuva. O Ra-01, situa-se em drenagem externa a uma cavidade (águas superficiais), enquanto o VT-01 localiza-se na saída da cavidade indicando águas de infiltração.

Percebe-se que todos os pontos possuem comportamento similar, observando-se que os valores do pluviógrafo (quadrado) estão ligeiramente acima da Reta Meteórica Global de Rozanski (1993), revelando águas menos evaporadas. Já os valores nos escoamentos dos pontos Ra-01 (triângulo) e VT-01 (círculo) apresentam-se ligeiramente abaixo da Reta Meteórica Global. Esta singularidade se deve ao fato das moléculas $H_2{}^{16}O$ serem mais leves que as moléculas $H_2{}^{18}O$ e $HD^{16}O$ e, por isso, evaporarem mais facilmente. Esta diferença faz com que a água sujeita à evaporação fique enriquecida em moléculas dos tipos $H_2{}^{18}O$ e $HD^{16}O$ (isótopos mais pesados). Apesar desta ligeira diferença, o ponto Pluv-01 apresenta a mesma assinatura isotópica nas demais amostras revelando que correspondem à mesma água com rápida infiltração.

Standard ABNT NBR 9898 of 1987 (CETESB; ANA, 2011), in addition to technical and occupational health and safety procedures, in order to avoid accidents, such as demonstrated in Figure 21. Figure 22 is an example of results.

To analyze Figure 22, it is worth highlighting the location of each of the points in relation to a cave. Pluv-01 is located in an external area and so is rainwater. Ra-01 is located in a drainage external to a cave (surface water), while VT-01 is located at the exit of the cave indicating infiltration water.

It can be seen that all points have similar behavior, with pluviograph values (square) slightly above Rozanski's Global Meteoric Line (1993), revealing less evaporated water. The values in the flows from points Ra-01 (triangle) and VT-01 (circle) are slightly below the Global Meteoric Line. This uniqueness is due to the fact that $H2^{16}O$ molecules are lighter than $H2^{18}O$ and $HD^{16}O$ molecules and, therefore, evaporate more easily. This difference causes water subject to evaporation to become enriched in molecules of the types $H2^{18}O$ and $HD^{16}O$ (heavier isotopes). Despite this slight difference, the Pluv-01 point presents the same isotopic signature as the other samples, revealing that they correspond to the same water with rapid infiltration.

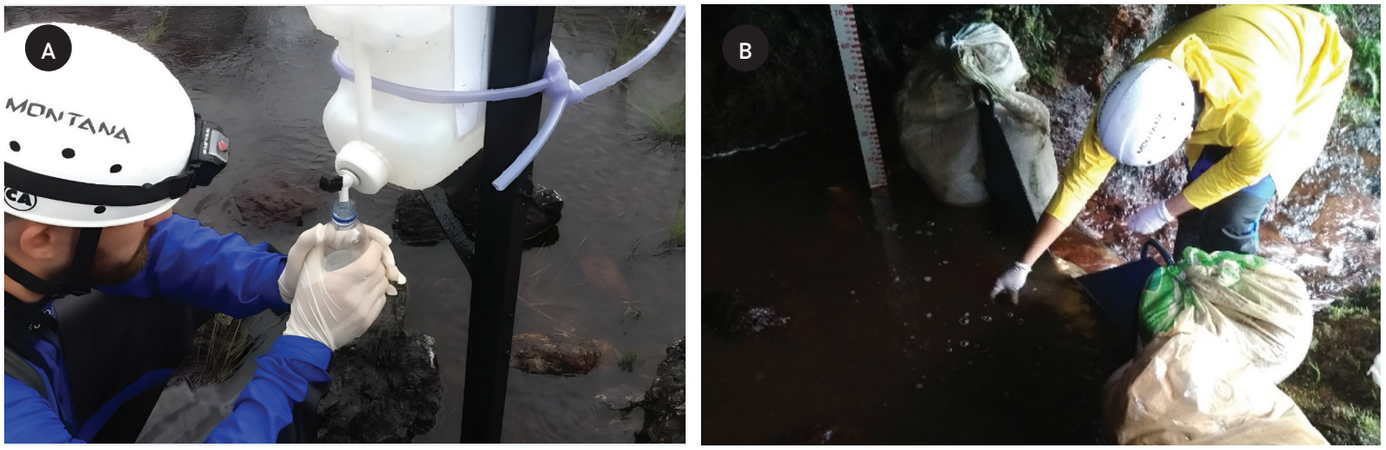


Figura 21: Coleta de amostras de água para análise de isótopos. A) ponto de coleta de água precipitada em ambiente externo, denominado PLUV01; B) ponto de coleta no interior da cavidade natural subterrânea, denominado VT. Fotos: Georgete Dutra.
Figure 21: Collection of water samples for isotope analysis. A) precipitation water collection point in an external environment, called PLUV01; B) collection point inside the cave called VT. Photos: Georgete Dutra.

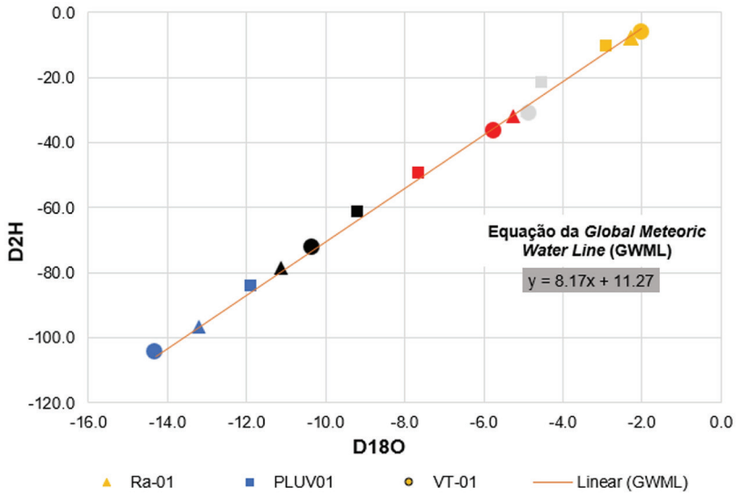


Figura 22: Diagrama δ^2H – $\delta18O$ para todas as amostras de água analisadas.
Figure 22: Diagram of δ^2H – $\delta18O$ for all water samples analyzed.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As águas que adentram as cavidades naturais subterrâneas possuem sinergia em diversas áreas, contribuindo com o transporte de materiais físicos, químicos e biológicos. Assim, podem favorecer a erosão, a sedimentação química, a sedimentação física, o aporte de nutrientes químicos e orgânicos e as alterações na condição microclimáticas das cavernas, interferindo diretamente na evolução e equilíbrio ecológico destes ecossistemas.

O estudo hidrogeológico no contexto de cavernas em minério de ferro depende da aplicação de uma série de métodos para a quantificação dos parâmetros que compõem o balanço hídrico associado à área de captação de uma caverna. Muitos desses métodos baseiam-se nas utilizações clássicas da literatura em hidrologia e hidrogeologia, sendo que, em alguns casos específicos, as cavernas em minério de ferro demandam alterações ou adaptações a este tipo de ambiente.

Alguns métodos de análise, como os testes com traçadores corantes, possuem aplicação extremamente recente no contexto das cavernas em minério de ferro, sendo que ainda não há publicações que descrevam, de forma abrangente, o comportamento de fluxo na zona vadosa associado a essas cavernas. Há risco de contaminação das amostras e dos testes por pessoas e/ou animais que transitam pela zona de despejo do traçador e adentram as cavernas. Em termos de segurança, como os serviços são realizados no período chuvoso, há um grande risco de acidentes pessoais associados à prática destes estudos.

7 FINAL CONSIDERATIONS

The waters that enter caves have synergy in several areas, contributing to the transport of physical, chemical and biological materials. Thus, they can favor erosion, chemical sedimentation, physical sedimentation, the supply of chemical and organic nutrients and changes in the microclimatic condition of caves, directly influencing the evolution and ecological balance of these ecosystems.

Hydrogeological study in the context of ferriferous caves depends on the application of a series of methods to quantify the parameters that make up the water balance associated with the catchment area of a given cave. Many of these methods are based on classic uses of the literature in hydrology and hydrogeology yet, in some specific cases, these require changes or adaptations to the environment.

Some methods of analysis, such as tests with colored tracers, have only very recently been applied to ferriferous caves, and there are still no publications that comprehensively describe flow behavior in the vadose zone associated with these caves. There is a risk of sample contamination and tests by people and/or animals that pass through the tracer dumping area and enter the caves. Furthermore, as the services are carried out during the rainy season, there is a great safety risk of personal accidents associated with the practice of these studies.

Diante da heterogeneidade do ambiente geológico onde estão inseridas as cavidades naturais subterrâneas e do complexo e variável arranjo da porosidade e permeabilidade nos corpos rochosos e solos, o uso dos traçadores pode auxiliar o conhecimento da zona de interação hídrica entre as cavernas e a vertente. Ressalte-se que, como as cavernas mostram sazonalidade, muitas vezes a própria água pode ser utilizada como traçador e, o mais importante, por ser inerte e ser um componente natural que faz parte do processo, não impacta o ambiente.

A infiltração caracterizada através dos dados dos ensaios de injeção de água, da presença de pluviógrafos nas cavidades durante a estação chuvosa e do monitoramento das drenagens / vertentes a montante das cavernas pode auxiliar na compreensão da dinâmica do aporte hídrico. Em geral, verifica-se que a água que adentra as cavernas associadas à formação ferrífera é oriunda da precipitação pluviométrica, sendo sua captação limitada por fraturas e canalículos.

Os estudos isotópicos servem para verificar a assinatura isotópica entre águas de diversas origens de forma a determinar sua história, seu tempo de permanência e de circulação, muitas vezes mostrando que as águas das cavidades naturais subterrâneas associadas à formação ferrífera são praticamente idênticas e similares à água precipitada, endossando, de forma geral, a inexistência de conexão das cavernas com águas subterrâneas.

A taxa e a duração do gotejamento possuem relação direta com a intensidade da chuva na superfície e influenciam a resposta em relação a inclinação da vertente onde situa-se a cavidade, duração da mesma e índice de umidade ou encharcamento do solo. De acordo com Horton (1940) e Philip (1957), o excesso de precipitação origina o escoamento superficial e reduz a infiltração. Isto tem sido corroborado, pois em estudos realizados até o momento, os maiores eventos de chuva não correspondem às maiores taxas de infiltração.

A caracterização da vazão através do monitoramento diário dos níveis d'água dentro e fora de cavernas permite o entendimento da dinâmica hídrica local. Os dados obtidos possibilitam calcular a vazão durante o período de chuvas e a quantidade de água que infiltra na cavidade. Desta forma, tais informações auxiliam na definição da área necessária para a proteção da cavidade (área de influência hídrica).

Da mesma forma, o mapeamento e monitoramento de pontos de infiltração de água mostra-se de grande valia. Os gotejamentos e fluxos, mesmo que sazonais, indicam pontos

Given the heterogeneity of the geological environment where caves are located and the complex and variable arrangement of porosity and permeability in rocky bodies and soils, the use of tracers can help to understand the zone of water interaction between caves and the slope. It should be noted that, as caves show seasonality, water itself can often be used as a tracer and, most importantly, because it is inert and a natural component that is part of the process, it does not impact the environment.

Infiltration characterized through data from water injection tests, the presence of rain gauges in caves during the rainy season and monitoring of drainages/slopes upstream of caves can help to understand the dynamics of water supply. In general, it appears that the water that enters caves associated with iron formations comes from rainfall, and its capture is limited by fractures and canaliculi.

Isotopic studies serve to determine the isotopic signature of waters of different origins in order to determine their history, residence time and circulation, often showing that waters of caves associated with iron formations are practically identical and similar to precipitated water, endorsing, in general, the lack of connection between these caves and groundwater.

The rate and duration of dripping are directly related to the intensity of rainfall on the surface and influence the response in relation to the inclination of the slope where the cave is located, the duration and the moisture content or waterlogging of the soil. According to Horton (1940) and Philip (1957), excess precipitation causes surface runoff and reduces infiltration. This has been corroborated by studies carried out to date, where the largest rain events did not correspond to the highest infiltration rates.

Characterizing flow through daily monitoring of water levels inside and outside caves leads to an understanding of local hydric dynamics. The data obtained makes it possible to calculate the flow during the rainy season and the amount of water that infiltrates the cave. In this way, such information helps to define the area necessary to protect the cave (area of water influence).

Likewise, mapping and monitoring water infiltration points proves to be of great value. Drips and flows, even if seasonal, indicate points of discontinuity opened in the massif, evidencing

de descontinuidade abertos no maciço, evidenciando áreas potenciais para queda de fragmentos (desplacamentos). As cavidades naturais subterrâneas possuem maior probabilidade de desabamentos nos eventos chuvosos. Durante a chuva ocorre maior infiltração/percolação de água nas descontinuidades e nos poros do próprio maciço rochoso lavando o material cimentante.

De forma geral, os métodos aqui apresentados podem ser utilizados conjuntamente ou parcialmente selecionados, a depender dos objetivos de cada estudo. A seguir, é apresentando um fluxograma como exemplo destes estudos.

Em todos os estudos deve ser realizada a análise da consistência, de forma a evitar erros grosseiros, sistemáticos e fortuitos. Os erros grosseiros geralmente estão relacionados às leituras e à anotação que não obedecem a um padrão definido. Os erros sistemáticos apresentam padrão. Já os erros fortuitos, muitas vezes, relacionam-se às oscilações, às imprecisões do método e aos erros devido à variação de voltagem na bateria (no caso de monitoramento remoto). Na análise de consistência consegue-se abolir os erros grosseiros e mitigar os demais erros na medida do possível.

Diversos métodos continuam em fase de teste e constituem um nicho de pesquisa promissor e inovador para o entendimento dos processos naturais em um tipo de ambiente tão singular/incomum, a nível global, como este das cavernas associadas às formações ferríferas e canga.

8 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que nos ajudaram e continuam nos auxiliando nos monitoramentos, desenvolvimento de métodos, discussões e evolução do conhecimento. Especificamente, neste contexto de monitoramento, agradecemos ao pessoal de campo e escritório: Bárbara Colen, Carlos Renato Gomes, Danilo Landim, Deivison Henrique, Dillian Moreira Santos, Frederico Augusto Ribeiro, Giovanni Paixão, Joel Varela, Juliana Timo, João Gomes, Marcos da Sé, Olemar Perazoli de Paula Filho, Rafael Silva, Rivelino Martins, Valdinei Bento, Walisson Guerreiro, Willyam de Carvalho Costa. Agradecemos as fotos gentilmente cedidas por André Bernardes, Rafael Scherer e Xavier Prous. Às empresas Carste, Hidrovia, MDGEO e Spelayon, nosso reconhecimento. Pela oportunidade, agradecemos à Vale nas pessoas de Ramon Araújo, Iuri Brandi e Lauro Amorim.

potential areas for fragments to fall (displacement); caves are more likely to collapse during rainy events. During rain, greater infiltration/percolation of water occurs in the discontinuities and pores of the rock mass itself, washing the cementing material.

In general, the methods presented here can be used together, or partially selected, depending on the objectives of each study. A flowchart is presented below as an example of these studies. Consistency analysis must be carried out in all studies to avoid gross, systematic and fortuitous errors. Gross errors are generally related to readings and annotations that do not follow a defined pattern. Systematic errors have a pattern. Fortuitous errors are often related to oscillations, method inaccuracies and errors due to battery voltage variations (in the case of remote monitoring). Consistency analysis can eliminate gross errors and mitigate others, as far as possible.

Several methods remain in the testing phase and constitute a promising and innovative research niche for understanding natural processes in such a unique/unusual type of environment, at a global level, such as the caves associated with iron and canga formations.

8 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank everyone who helped us and continues to help us with monitoring, method development, discussions and knowledge evolution. Specifically, in this monitoring context, we would like to thank the field and office staff: Bárbara Colen, Carlos Renato Gomes, Danilo Landim, Deivison Henrique, Dillian Moreira Santos, Frederico Augusto Ribeiro, Giovanni Paixão, Joel Varela, Juliana Timo, João Gomes, Marcos da Sé, Olemar Perazoli de Paula Filho, Rafael Silva, Rivelino Martins, Valdinei Bento, Walisson Guerreiro, Willyam de Carvalho Costa. We would like to thank the photos kindly provided by André Bernardes, Rafael Scherer and Xavier Prous.To the companies Carste, Hidrovia, MDGEO and Spelayon, our recognition. For the opportunity, we would like to thank Vale in persons of Ramon Araújo, Iuri Brandi and Lauro Amorim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. [ANA (2002)]. **Projeto Operação da Rede Hidrometeorológica da ANA**: análise da consistência de dados sedimentométricos e de qualidade de água das sub-bacias: 40, 41, 42, 43, 44, 45, 54, 55, 56, 60 e 61. Belo Horizonte: CPRM, 2002.

ATAÍDE, E. S. **Zoneamento florístico em campo ferruginoso em uma área do sul-sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000 – Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 jan. 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Alterada pelas Resoluções CONAMA Nº393/2007, nº 397/2008, nº 410/2009 e nº 430/2011. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 454 de 1 de novembro 2012. "Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 nov. 2012.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras**: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2018. 327p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Omega, 1976. v. 2.

DUNCAN, D. *et al*. **EPA Guidelines**: regulatory monitoring and testing water and wastewater sampling. Adelaíde: Environment Protection Authority, Jun. 2007.

DUTRA, G. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. *In*: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (Orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013, Barreiras. **Anais** [...] Campinas: SBE, 2013. p. 415-426.

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.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. Metodologia básica de pesquisa de água subterrânea. *In*: FEITOSA, F. A. C. *et al*. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. p. 179-207.

FEITOSA, F. A. C. *et al*. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3 ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008.

GOLDSCHEIDER, N. *et al*. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.

GROVES, C. Hydrological methods. *In*: GOLDSCHEIDER, N.; DREW, D. (Eds.). **Methods in karst hydrogeology**. London: Taylor e Francis, 2007. p. 45-64.

HEATH, D. *et al*. **Field Manual for Water Quality Sampling**. Arizona: The University of Arizona; Water Resources Research Cente, 1995. 106 p.

HEATH, R.C. **Basic ground-water hydrology**. Reston: U.S. Geological Survey, 1983. (Water-Supply Paper 2220).

HIDROVIA geologia e meio ambiente. Subprograma de subsídios técnicos para definição de área de influência das cavidades de máxima relevância: Projeto Carajás – Serra Norte. **Relatório técnico**... Belo horizonte, 2017. 168 p.

HORTON, R.E. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Proceedings [...] **Soil Science Society of America**, v. 5, p. 399-417, 1940.

LAROCQUE, M. *et al*. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). **Journal of Hydrology**, v. 67, n. 1-4, p. 25-46, 1998.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C. *et al*. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. p. 53-91.

MDGEO. Programa de estudos da área de contribuição hídrica S11D_0001. **Relatório técnico** [...] Belo Horizonte: MDGEO, 2020.

PHILIP, J.R. The Theory of infiltration: 4. sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, v. 84, p. 257-264, 1957.

QUADROS, B. C.; FRANCO NETO, T. P. **Estimativa da taxa de infiltração em solo argiloso, sob diferentes condições de umidade**. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

ROZANSKI, K. L.; ARAGUÁS, L. A.; GONFIANTINI, R. Isotopic patters in modern global precipitation. *In*: SWART, P.K. *et al*. (Eds.). **Climate Change in Continental Isotopic Records**. Washington: União Geofísica Americana, 1993. p. 1-36. (Geophysical Monograph Series, v. 78).

SOUZA PINTO, N. L. *et al*. **Hidrologia básica**. [*S.l.*]: Blucher, 1976.

TEIXEIRA, W. *et al*. (Orgs.). **Decifrando a terra**. São Paulo. Oficina de Textos, 2001.

THRAILKILL, J. Flow in a limestone aquifer as determined from water tracing and water levels in wells. **Journal of Hydrology**, v. 78, p. 123-136, 1985.



Caverna/Cave S11D_0001
Foto/Photo: André B. Machado



10

Coleta de água para eDNA/Water sampling for eDNA
Foto/Photo: Thadeu Pietrobon

Desenvolvimento e aplicação de novos métodos e tecnologias para o monitoramento biológico de cavernas ferríferas

XAVIER PROUS
GISELE LOPES NUNES
GUILHERME OLIVEIRA
LEONARDO CARREIRA TREVELIN
MARCUS PAULO DE OLIVEIRA
RONNIE CLEY DE OLIVEIRA ALVES
SANTELMO SELMO DE VASCONCELOS JÚNIOR
VALÉRIA DA CUNHA TAVARES
VITOR CIRILO ARAUJO SANTOS

1 INTRODUÇÃO

Como vimos ao longo dos capítulos anteriores, os monitoramentos espeleológicos existentes hoje em dia são capazes de identificar impactos potenciais advindos de atividades potencialmente poluidoras no entorno de áreas com cavernas. Quando bem aplicados, esses monitoramentos viabilizam a implantação de projetos e permitem uma operação segura para o patrimônio espeleológico. Nos últimos anos, observou-se um avanço significativo no desenvolvimento e na adoção de novas tecnologias e metodologias para o monitoramento e para a avaliação ambiental, principalmente em áreas de mineração. Inovações como o uso de dados moleculares, transmissores miniaturizados, aplicação da inteligência artificial e aprendizado de máquina (*machine learning*) associadas à análise de *big data* têm o potencial de transformar a forma como os dados ambientais são coletados, processados e interpretados. Esses progressos oferecem oportunidades inéditas para aprimorar a precisão, eficiência e abrangência das ações de monitoramento ambiental em regiões próximo a cavernas, especialmente daquelas associadas à análise dos efeitos de atividades potencialmente prejudiciais ao patrimônio espeleológico.

Nesse contexto, este capítulo avalia o desenvolvimento e a aplicação dessas novas tecnologias no monitoramento biológico de cavernas inseridas na formação ferrífera, com ênfase em suas vantagens, desafios e necessidade de aprimoramento para ampla implantação. Além disso, discutimos como essas inovações podem contribuir para a preservação desses ambientes subterrâneos enquanto permitem a implantação e operação de empreendimentos no entorno de cavernas com segurança e eficiência, em especial operações minerárias associadas à exploração do minério de ferro.

2 NOVAS ABORDAGENS PARA O MONITORAMENTO DA FAUNA CAVERNÍCOLA

2.1 Radiofrequência (*pit tags*) aplicada a estudos de morcegos cavernícolas

2.1.1 Introdução ao método

Estudos ecológicos sobre o uso da paisagem por morcegos abrangem diferentes métodos,

Development and application of new methods and technologies for biological monitoring of ferriferous caves

XAVIER PROUS
GISELE LOPES NUNES
GUILHERME OLIVEIRA
LEONARDO CARREIRA TREVELIN
MARCUS PAULO DE OLIVEIRA
RONNIE CLEY DE OLIVEIRA ALVES
SANTELMO SELMO DE VASCONCELOS JÚNIOR
VALÉRIA DA CUNHA TAVARES
VITOR CIRILO ARAUJO SANTOS

1 INTRODUCTION

As seen in the previous chapters, speleological monitoring systems currently in place can identify potential impacts arising from potentially polluting activities in the vicinity of cave areas. When properly applied, these monitoring systems enable the implementation of projects and allow for safe operations for speleological heritage. Recent years have seen significant progress in the development and adoption of new technologies and methodologies for environmental monitoring and assessment, especially in mining areas. Innovations, such as the use of molecular data and miniaturized transmitters, and the application of artificial intelligence and machine learning associated with big data analysis, have the potential to transform the way environmental data is collected, processed, and interpreted. These advances offer unprecedented opportunities to improve the accuracy, efficiency, and scope of environmental monitoring actions in regions close to caves, especially those associated with the analysis of the effects of activities that are potentially harmful to speleological heritage.

In this context, this chapter evaluates the development and application of these new technologies for biological monitoring of caves inserted in ferriferous formations, with emphasis on their advantages, challenges and needs for improvement for widespread implementation. In addition, we discuss how these innovations can contribute to the preservation of these subterranean environments while allowing the implementation and operation of projects around caves with safety and efficiency, especially mining operations associated with the exploitation of iron ore.

2 NEW APPROACHES FOR MONITORING CAVE FAUNA RADIO FREQUENCY (PIT TAGS) APPLIED TO STUDIES OF CAVE BATS

2.1 Introduction to the method

Ecological studies on landscape use by bats encompass different methods, such as radio telemetry, bioacoustics, GPS transmitters, video monitoring, light markings, bands

como radio-telemetria, bioacústica, transmissores GPS, videomonitoramento, marcações com luz, anilhas e colares (Wild *et al.* 2022, Britzke *et al.* 2014, Barclay e Bell 1988, Kunz e Weise 2009, Mello 2014). Embora todos forneçam importantes dados a respeito da movimentação desses animais, há diferentes limitações operacionais no emprego dessas técnicas. As principais desvantagens referem-se às baixas taxas de recaptura, ao elevado esforço amostral, ao tempo de duração de baterias, às dificuldades na interpretação do sinal amostrado, ao tipo de abrigo e condições ambientais necessárias à aplicação, entre outras (Fagerstone e Johns 1987, Ellison 2008). Ainda que delineadas adequadamente, as restrições metodológicas dessas ferramentas acabam limitando o acesso à informação a respeito das espécies.

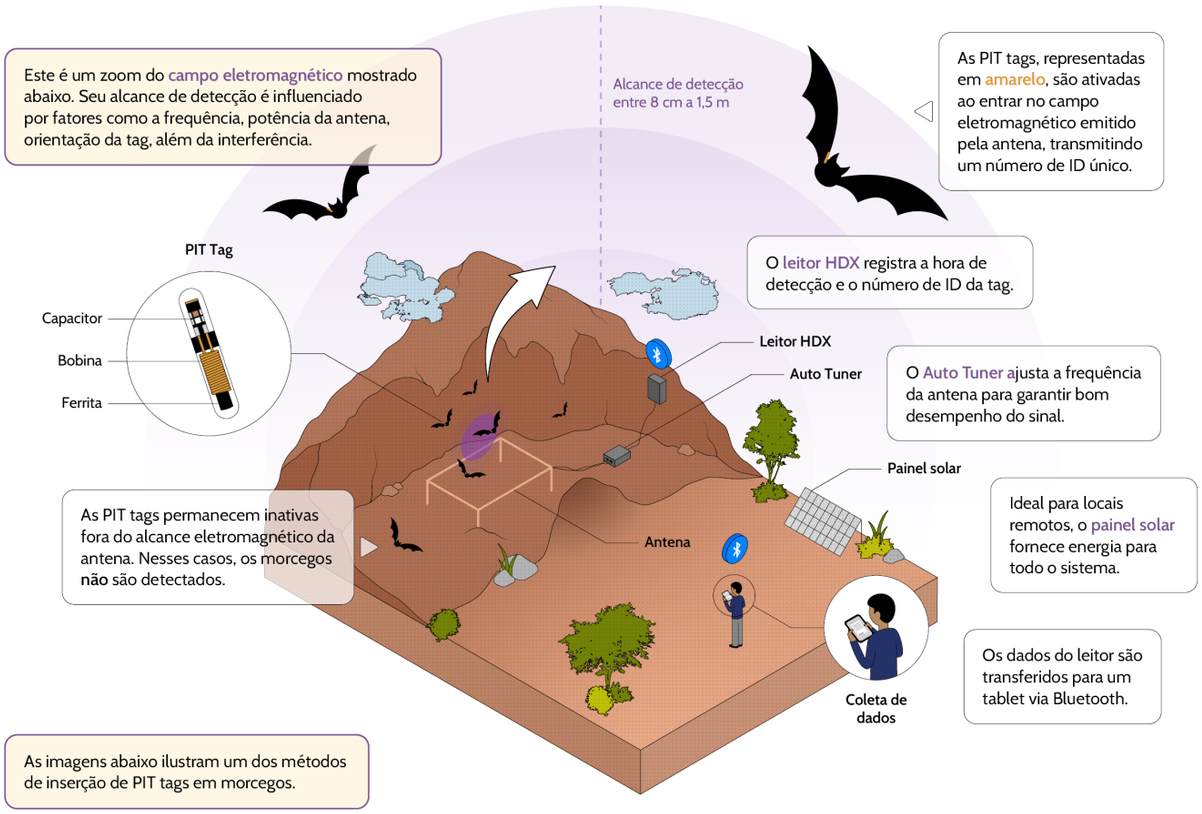
Nesse contexto, um método que tem sido cada vez mais utilizado nos estudos de padrões de movimentos é o uso de marcadores do tipo *Transponders Passivos Integrados* (*PIT tag*) (Gibbons e Andrews 2004). A técnica foi inicialmente proposta para uso em peixes (Prentice and Park 1983), embora venha sendo aplicada a outras espécies silvestres em diferentes ambientes nos últimos anos, incluindo desde invertebrados, como lesmas (Forbes *et al.* 2020), a vertebrados, como aves (e. g. He *et al.* 2013, Hou *et al.* 2015) e morcegos (e.g. Kerth e Konig 1996, Kerth e Reckardt 2003, Garroway e Broders 2007, Adams e Hayes 2008, O'Shea *et al.* 2010, van Harten *et al.* 2019). A marcação com esses *transponders* consiste na injeção subcutânea de uma *tag* (dispositivo eletrônico/eletromagnético) encapsulada em vidro inerte que, ao invés de operar com bateria, é energizada por uma antena que realiza uma leitura a cada passagem do organismo marcado (Figura 1). Dessa forma é possível coletar informações sobre a movimentação de cada indivíduo a longo prazo (Gibbons e Andrews 2004). Em relação à marcação convencional com anilhas, o uso de *PIT tags* apresenta a vantagem de não ser removido pelo morcego, nem gerar lesões e infecções em decorrência de reações com o material utilizado (Ellison 2008, Kunz e Weise 2009). Além disso, o uso de *PIT tags* não requer a recaptura dos morcegos, já que após a marcação os dados são coletados passivamente a cada passagem pela antena durante toda a vida dos respectivos indivíduos, ou durante o tempo em que o sistema permanecer montado. Além de ampliar o período possível de coletar os dados e a capacidade de obtenção de volume de informação de forma contínua, essa ferramenta minimiza o impacto da recaptura e manuseio repetitivo dos espécimes, bem como os vieses inerentes aos estudos de marcação convencionais (Kunz e Brock 1975, Winhold e Kurta 2008).

and collars (Wild *et al.* 2022, Britzke *et al.* 2014, Barclay and Bell 1988, Kunz and Weise 2009, Mello 2014). Although all of these provide important data on the movements of these animals, there are different operational limitations in their use. The main disadvantages refer to low recapture rates, high sampling effort, battery life, difficulties in interpreting the sampled signal, and the type of shelter and environmental conditions required for application, among others (Fagerstone and Johns 1987, Ellison 2008). Even when adequately designed, the methodological restrictions of these tools end up limiting the acquisition of information about the species.

In this context, a method that has been increasingly used in studies of movement patterns is *Passive Integrated Transponders* (*PIT tags*) (Gibbons and Andrews 2004). The technique was initially proposed for use in fish (Prentice and Park 1983), although it has been applied to other wild species in different environments in recent years, including invertebrates such as slugs (Forbes *et al.* 2020) and vertebrates such as birds (e.g., He *et al.* 2013, Hou *et al.* 2015) and bats (e.g., Kerth and Konig 1996, Kerth and Reckardt 2003, Garroway and Broders 2007, Adams and Hayes 2008, O'Shea *et al.* 2010, van Harten *et al.* 2019). Tagging with these *transponders* involves the subcutaneous injection of a tag (electronic/electromagnetic device) encapsulated in inert glass that, instead of operating on a battery, is powered by an antenna that performs a reading each time the tagged organism comes near (Figure 1). In this way, it is possible to collect information about the movement of each individual over the long term (Gibbons and Andrews 2004). Compared to conventional tagging with rings, an advantage of *PIT tags* is that it cannot be removed by the bat, and it does not cause injuries and infections due to reactions with the material used (Ellison 2008, Kunz and Weise 2009). Furthermore, the use of *PIT tags* does not require the recapture of individual bats since, after tagging, data is collected passively each time the organism passes by the antenna throughout its life, or during the time that the system remains in place. In addition to extending the possible period of data collection and the capacity to obtain a volume of information continuously, this tool minimizes the impact of recapture and repetitive handling of specimens, as well as the biases inherent in conventional marking studies (Kunz and Brock 1975, Winhold and Kurta 2008).

Como funcionam as PIT tags?

As tags do tipo PIT (Transmissor Indutivo Passivo, do inglês *Passive Integrated Transponder*) são utilizadas para identificar espécies individuais. Elas correspondem a pequenos microchips, não operados por baterias, que possuem um código ID único. Elas são inseridas no dorso dos morcegos, como mostrado na parte inferior da imagem.





O morcego é anestesiado.

É realizado um corte subcutâneo na área de inserção da PIT tag.

Após o procedimento, o corte é fechado com cola cirúrgica.

Figura 1: Aplicação de *PIT tags* em estudos com morcegos. As etapas para o uso envolvem seleção das *tags*, conforme organismo modelo, aplicação adequada nos espécimes e configuração do sistema de radiofrequência.

How do PIT tags work?

PIT tags (*Passive Integrated Transponders*) are used to identify individual species. They are small microchips, not powered by batteries, that contain a unique ID code. They are inserted into the back of bats, as shown at the bottom of the image.

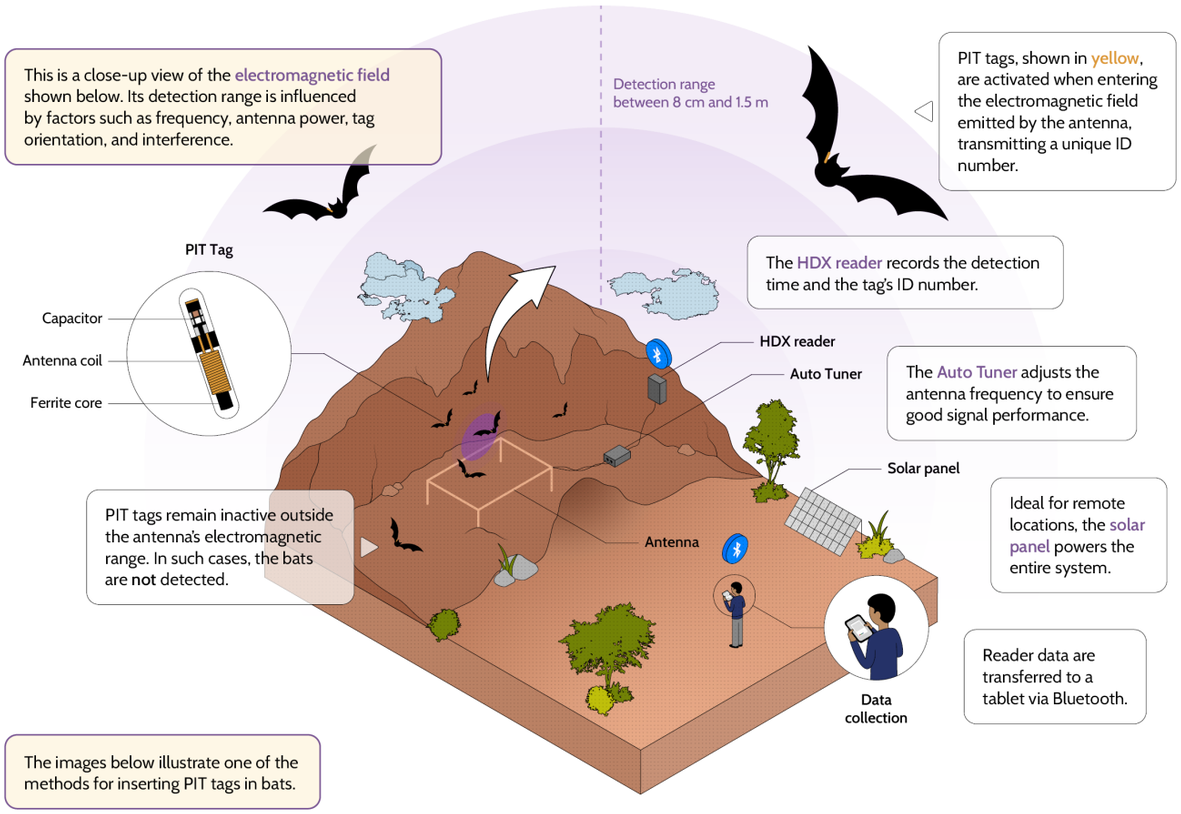


Figure 1: Application of *PIT tags* in studies with bats. The steps for use involve tag selection according to the model organism, appropriate application to the specimens and configuration of the radiofrequency system.

2.1.2 Exemplos atuais

A partir dos anos 2000, a evolução de *microchips* de menor custo favoreceu o emprego de *PIT tags* como ferramenta nos estudos sobre comportamento e ecologia de animais silvestres (Kerth e Reckardt 2003, Garroway e Bróders 2007, Adams e Hayes 2008, O'Shea *et al.* 2010, Britzke *et al.* 2014, Wild *et al.* 2022). Em relação aos morcegos, o uso dessa técnica foi aprimorado após o surgimento da síndrome do nariz branco (*White Nose Syndrome* – WNS), uma doença infecciosa que afetou morcegos hibernantes no leste dos Estados Unidos e resultou em altas taxas de mortalidade (Lorch *et al.* 2011). Geralmente, morcegos de regiões temperadas hibernam em cavernas durante o inverno para sobreviver ao período de baixa abundância de presas. No início da primavera, eles emergem e migram para suas áreas de verão. Entretanto, morcegos infectados pela síndrome do nariz branco despertam antes do previsto e passam a se movimentar pela caverna e paisagem, sendo vítimas da baixa temperatura ou da ausência de alimento (Cheng *et al.* 2021, Frick *et al.* 2017, Meteyer *et al.* 2009). Nesse cenário, dada a necessidade de entender o comportamento dos morcegos para diagnóstico das colônias e detecção de locais contaminados, houve um aumento significativo de estudos com essa ferramenta. Alguns exemplos consistem no monitoramento de espécies potencialmente afetadas (Jackson *et al.* 2022), em rotas de dispersão do fungo (Jackson 2019), e até na avaliação da eficácia de tratamento probiótico para redução da mortalidade causada pela doença (Hoyt *et al.* 2019).

Em outros países, novas aplicações foram emergindo conforme evolução do método. *PIT tags* foram aplicados para avaliar tamanho da área de vida, atividade, uso do habitat e dieta de morcegos na Alemanha (Dechmann *et al.* 2014). Nesse estudo, constataram que não há diferenças nesses aspectos de vida entre os indivíduos machos e fêmeas da espécie migrante *Nyctalus noctula* (Schreber, 1774). Na Inglaterra, Finch e colaboradores (2020) utilizaram dados de radiofrequência para validar modelos locais sobre a conectividade das paisagens para a espécie *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber, 1774). Na Austrália, essa ferramenta foi otimizada para monitorar uma espécie de morcego ameaçada de extinção (*Miniopterus orianae bassanii* (Cardinal & Christidis, 2000)) em duas cavernas (van Harten *et al.* 2019). Em outro exemplo, um programa de pesquisa voltado para *Rhinonicteris aurantia* (Gray 1845), uma espécie de morcego insetívoro e cavernícola obrigatório, teve entre seus objetivos o de identificar e compreender o número,

2.1.2 Current examples

Since the 2000s, the development of lower-cost *microchips* has favored the use of *PIT tags* as a tool in studies on the behavior and ecology of wild animals (Kerth and Reckardt 2003, Garroway and Bróders 2007, Adams and Hayes 2008, O'Shea *et al.* 2010, Britzke *et al.* 2014, Wild *et al.* 2022). The use of this technique with bats was improved after the emergence of *white-nose syndrome* (*WNS*), an infectious disease that affected hibernating bats in the eastern United States and resulted in high mortality rates (Lorch *et al.* 2011). Bats in temperate regions typically hibernate in caves during the winter to survive the period of low prey abundance. In early spring, they emerge and migrate to their summer areas. However, bats infected with white-nose syndrome wake up earlier than expected and start moving around the cave and landscape, falling victim to low temperatures or lack of food (Cheng *et al.* 2021, Frick *et al.* 2017, Meteyer *et al.* 2009). The need to understand bat behavior to diagnose colonies and detect contaminated sites under this scenario resulted a significant increase in studies using *PIT tags*. Some examples include monitoring potentially affected species (Jackson *et al.* 2022), fungus dispersal routes (Jackson 2019), and even evaluating the effectiveness of probiotic treatment to reduce mortality caused by the disease (Hoyt *et al.* 2019).

New applications have emerged in other countries as the method has evolved. *PIT tags* were applied to assess home range size, activity, habitat use, and the diet of bats in Germany (Dechmann *et al.* 2014). This study found no differences in these aspects of life between male and female individuals of the migrant species *Nyctalus noctula* (Schreber, 1774). In England, Finch and collaborators (2020) used radiofrequency data to validate local models of landscape connectivity for the species *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber, 1774). In Australia, this tool was optimized to monitor the endangered bat species *Miniopterus orianae bassanii* (Cardinal & Christidis 2000) in two caves (van Harten *et al.* 2019). In another example, a research program targeting *Rhinonicteris aurantia* (Gray 1845), an obligate insectivorous and cave-dwelling bat, aimed to identify and understand the number, distribution, and movement of

a distribuição e o movimento dos morcegos entre os abrigos na região de Pilbara (oeste da Austrália Ocidental). Além do uso das técnicas de radiotelemetria (apresentadas no capítulo sobre monitoramento de morcegos), o uso de *PIT tags* e instalação de sistemas ativos de gravação na entrada de várias cavernas forneceu um alto nível de detalhamento dos movimentos de indivíduos nas entradas das cavernas e entre elas (Bullen e Reiffer 2019, 2022). Tais exemplos demonstram a flexibilidade de uso da ferramenta e a possibilidade de aplicação, conforme o objetivo do estudo.

2.1.3 Aplicações potenciais

Os usos dessa tecnologia abrangem, majoritariamente, movimento, padrão de atividade e sobrevivência de espécies, conforme estudos supracitados. Apresenta ainda eficácia no monitoramento de grandes colônias por longo tempo, uma vez que não requer baterias ou manutenção (van Harten *et al.* 2019). A técnica é útil para localizar e identificar indivíduos que se alternam entre abrigos, informações que são essenciais para avaliar o uso sazonal da paisagem pelas espécies e criar ferramentas de conservação (Joly 2019). Pode ser utilizada ainda para determinar os locais preferenciais de forrageio a partir do abrigo, por meio da instalação de antenas de alta detecção nas principais rotas de dispersão.

Em 2022, foi realizado um estudo piloto com a aplicação de *PIT tags* em morcegos cavernícolas brasileiros (BioEspeleo 2023). O objetivo era verificar quais fatores poderiam influenciar o comportamento dos morcegos que residiam em uma caverna próximo às operações de uma mina na região de Carajás, onde são frequentes o desmonte de rochas e a movimentação de maquinário. Para tal, um sistema de radiofrequência com três antenas foi montado na caverna (Figura 2), no intuito de verificar a movimentação dos espécimes nos dias com e sem desmonte de rochas. Como resultado, observou-se que a movimentação é influenciada, principalmente, por mudanças na temperatura e umidade no ambiente cavernícola. Entretanto, em dias de desmonte, a proximidade do local do evento promoveu maior movimentação dos morcegos (BioEspeleo 2023). Essa relação ocorreu independentemente do nível de vibração no solo (onda sísmica) que chegou à caverna, levantando hipóteses de que a maior atividade da colônia possa estar associada à pressão acústica do desmonte ou aos ruídos sonoros promovidos pelas máquinas na praça de desmonte ao longo do dia. Essa aplicação piloto traz luz sobre o emprego dessa ferramenta

bats between roosts in the Pilbara Region (the west of western Australia). In addition to the use of radiotelemetry techniques (presented in the chapter on bat monitoring), the use of *PIT tags* and the installation of active recording systems at the entrances of several caves has provided a high level of detail on the movements of individuals at and between cave entrances (Bullen and Reiffer 2019, 2022). Such examples demonstrate the flexibility of the tool and its application, depending on the objective of the study.

2.1.3 Potential applications

The uses of this technology mainly include investigating the movement, activity patterns and survival of species, according to the aforementioned studies. It is also effective at monitoring large colonies over a long period of time, since it does not require batteries or maintenance (van Harten *et al.* 2019). The technique is useful for locating and identifying individuals that alternate between shelters, information that is essential for assessing the seasonal use of the landscape by species and creating conservation tools (Joly 2019). It can also be used to determine preferred foraging sites from the shelter by installing high-detection antennas on main dispersal routes.

In 2022, a pilot study was conducted using *PIT tags* on Brazilian cave bats (BioEspeleo 2023). The objective was to determine which factors could influence the behavior of bats residing in a cave near a mine operation in the Carajás Region, where rock blasting and machinery movement are frequent. To this end, a radiofrequency system with three antennas was set up in the cave (Figure 2) to document the movement of individuals on days with and without rock blasting. The project found that bat movement was mainly influenced by changes in temperature and humidity in the cave environment. However, on days of blasting, proximity to the event site promoted greater bat movement (BioEspeleo 2023). This relationship occurred regardless of the level of ground vibration (seismic wave) that reached the cave, raising hypotheses that increased activity of the colony may be associated with the acoustic pressure of the blasting or the noise produced by the machines in the blasting area throughout the day. This pilot application sheds light on the use of this tool



Figura 2: Sistema de radiofrequência utilizado em caverna ferrífera do estado do Pará (Floresta Nacional de Carajás). A) Montagem do sintonizador de antena. B) Leitura de validação do *PIT tag* aplicado no morcego. C) Antena do tipo *passby* instalada próximo à colônia. D) Bancada de leitores e fonte de energia para alimentação do sistema. E) Antena do tipo *passtrough* montada na entrada da caverna. Fonte: BioEspeleo 2023.

Figure 2: Radiofrequency system used a ferriferous cave in the state of Pará (Carajás National Forest). A) Antenna tuner assembly. B) Validation reading of the *PIT tag* applied to the bat. C) *Passby* antenna installed near the colony. D) Reader bench and power source to power the system. E) *Passtrough* antenna mounted at the cave entrance. Source: BioEspeleo 2023.

para respostas cotidianas da mineração, atuando na interface entre conservação e uso de paisagem cársticas, essenciais à preservação de morcegos.

2.1.4 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para o uso

A relação entre a massa do dispositivo e do animal é um dos parâmetros mais críticos para o rastreamento (Egert-Berg *et al.* 2018, Hagen *et al.* 2011, Roeleke *et al.* 2016, Wikelski *et al.* 2006, Wikelski *et al.* 2010). Em geral, é indicado que dispositivos não excedam a 5% da massa corpórea do indivíduo monitorado, no intuito de minimizar possíveis efeitos negativos no comportamento ou *fitness* (Brigham 1988, Kenward 2000). Como muitas espécies de morcegos são pequenas (algumas pesando menos de 7gramas), esse limite pode ser ocasionalmente excedido (até ~10%) sem efeitos constatados por um curto período (ex. 20 dias) (Boitani 2000, Portugal e White 2018). De toda forma, para lidar com essa questão, atualmente há *PIT tags* disponíveis no mercado a partir de 0,027 gramas, com dimensões similares a um grão de arroz (ex. 8 milímetros x 1,4 milímetros. Dessa forma, é essencial no desenho amostral previsto o dimensionamento adequado dos *PIT tags* ao organismo modelo.

O tamanho das entradas das cavernas também impõe desafios para o uso da tecnologia, uma vez que o alcance da detecção das antenas é limitado, em alguns casos com a necessidade de o animal passar a menos de 30 centímetros para ser detectado (Adams & Ammerman, 2015, Gibbons & Andrews, 2004, Norquay & Willis, 2014). Alternativas como o fechamento parcial da entrada, afunilando a saída dos morcegos para uma janela, e o uso de antenas em forma de zigue-zague já foram utilizadas, mas podem implicar em efeitos negativos como as mudanças no modo de voo, alterações de trajetória, comportamento de evitação e ataque às estruturas (van Harten *et al.* 2019). O desenvolvimento de protocolos padronizados e a adoção de métricas específicas (para minimizar o "ruído" das gravações, por exemplo) podem aprimorar a capacidade de detecção das antenas de maiores dimensões, ampliando a aplicabilidade da técnica em cavernas com entradas mais amplas, como apresentado por van Harten e colaboradores (2019), com antenas de até 22 metros ao todo, capazes de detectar a passagem de animais a distâncias de até um metro da estrutura.

O custo para o amplo uso dessa ferramenta também é um fator limitante. Como demonstrado, o sistema de radiofrequência

for everyday mining responses, acting at the interface between conservation and the use of karst landscapes, which is essential for the preservation of bats.

2.1.4 Limitations, challenges and development needs for use

The ratio of device mass to animal mass is one of the most critical parameters for tracking (Egert-Berg *et al.* 2018, Hagen *et al.* 2011, Roeleke *et al.* 2016, Wikelski *et al.* 2006, Wikelski *et al.* 2010). In general, it is recommended that devices should not exceed 5% of the body mass of the monitored individual to minimize possible negative effects on behavior or *fitness* (Brigham 1988, Kenward 2000). Because many bat species are small (some weighing less than 7 grams), this limit can occasionally be exceeded (up to ~10%) without observed effects for a short period (e.g., 20 days) (Boitani 2000, Portugal and White 2018). In any case, to deal with this issue, there are currently *PIT tags* available on the market weighing as low as 0.027 grams, with dimensions similar to those of a grain of rice (e.g., 8 millimeters x 1.4 millimeters). Therefore, it is essential that the planned sample design adequately size the *PIT tags* for the model organism.

The size of cave entrances also poses challenges for the use of this technology, since the detection range of the antennas is limited, in some cases requiring the animal to pass within 30 centimeters to be detected (Adams & Ammerman, 2015, Gibbons & Andrews, 2004, Norquay & Willis, 2014). Alternatives such as partially closing the entrance, funneling the bats' exit to a window, and the use of zigzag-shaped antennas have already been used, but they can imply negative effects such as changes in flight mode, trajectory alterations, avoidance behavior, and attack on structures (van Harten *et al.* 2019). The development of standardized protocols and the adoption of specific metrics (to minimize the "noise" of recordings, for example) can improve the detection capacity of larger antennas, expanding the applicability of the technique in caves with wider entrances, as presented by van Harten and collaborators (2019), with antennas measuring up to 22 meters in total, capable of detecting the passage of animals at distances of up to one meter away.

The cost of widespread use of this tool is also a limiting factor. As demonstrated, the radiofrequency system consists of

consiste em leitor, sintonizador, fonte de energia e antenas, além dos *PIT tags* e aplicadores a serem utilizados nos animais. A depender do desenho amostral, pode ser necessário repetir essa configuração de equipamentos em diferentes abrigos, elevando o custo final para aplicação dessa ferramenta. De toda forma, uma vez instalado, tal sistema obtém dados de forma contínua e por longos períodos, evitando custos adicionais por sucessivas campanhas de campo, como geralmente ocorrem em métodos tradicionais (ex. captura e remarcação de indivíduos).

Diante das limitações e desafios, a utilização do método deve ser analisada caso a caso. Sua utilização em programas de monitoramento de morcegos vinculados a um processo de licenciamento ambiental deve ser adotada quando os objetivos não puderem ser respondidos com outras técnicas ou quando a radiofrequência produzir melhores respostas.

2.2 USO DE DNA METABARCODING E DNA AMBIENTAL PARA MONITORAMENTO DA FAUNA CAVERNÍCOLA

2.2.1 Introdução ao método

Entre os diversos ecossistemas encontrados no Brasil, as cavernas recebem uma atenção especial devido à sua importância ecológica e ao elevado grau de endemismo das espécies que ocupam esses hábitats, havendo uma legislação ambiental dedicada à proteção dos ambientes subterrâneos. Devido à inerente dificuldade de realização de inventários faunísticos mais abrangentes em tais ambientes, há grandes desafios para a execução de diagnósticos e monitoramentos em larga escala da fauna cavernícola utilizando abordagens taxonômicas convencionais (ver Gallão e Bichuette 2018).

Dessa forma, a aplicação de código de barras de DNA (DNA *barcoding)* tem viabilizado o rápido levantamento e caracterização da biodiversidade, mesmo nos casos de regiões para as quais ainda não foram realizados levantamentos formais da fauna. O DNA *barcoding* é uma abordagem da biologia molecular utilizada para a caracterização e a identificação de espécies a partir do sequenciamento de pequenos fragmentos de DNA (Hebert *et al.* 2003). O gene mitocondrial codificante para a subunidade 1 da enzima citocromo c oxidase (COX1) é considerado o melhor marcador para a caracterização molecular de animais (DeWalt 2011), tendo sido amplamente utilizado em abordagens de atribuição taxonômica e sistemática molecular nos últimos 20 anos.

Estudos ambientais normalmente abordam a biodiversidade visível. Porém, microrganismos são importantes componentes

a reader, tuner, power source and antennas, in addition to the *PIT tags* and applicators to be used on the animals. Depending on the sampling design, it may be necessary to repeat an equipment configuration in different shelters, increasing the final cost of applying this tool. In any case, once installed, such a system obtains data continuously and for long periods, avoiding additional costs for successive field campaigns, as usually occurs with traditional methods (e.g., capturing and re-marking individuals).

Given the limitations and challenges, the use of this method should be analyzed on a case-by-case basis. Its use in bat monitoring programs linked to an environmental licensing process is recommended when the objectives cannot be met with other techniques or when radiofrequency produces better responses.

2.2 USE OF DNA METABARCODING AND ENVIRONMENTAL DNA FOR MONITORING CAVE FAUNA

2.2.1 Introduction to the method

Among the various ecosystems found in Brazil, caves receive special attention due to their ecological importance and the high degree of endemism of the species that occupy them, with environmental legislation dedicated to the protection of subterranean environments. Due to the inherent difficulty with carrying out more comprehensive faunal inventories in such environments, there are major challenges in performing large-scale diagnostics and monitoring of cave fauna using conventional taxonomic approaches (see Gallão and Bichuette 2018).

Thus, the application of *DNA barcoding* has enabled the rapid survey and characterization of biodiversity, even in regions where formal fauna surveys have not yet been carried out. *DNA barcoding* is a molecular biology approach used to characterize and identify species based on the sequencing of small DNA fragments (Hebert *et al.* 2003). The mitochondrial gene encoding subunit 1 of the cytochrome c oxidase enzyme (COX1) is considered the best marker for the molecular characterization of animals (DeWalt 2011) and has been widely used in taxonomic assignment and molecular systematics over the last 20 years.

Environmental studies typically address visible biodiversity. However, microorganisms are important components of

dos ecossistemas, além de serem a sua base de suporte e, não necessariamente, a presença de organismos multicelulares pode ser notada por métodos baseados em percepção visual ou amostragem direta nos hábitats nos quais ocorrem. Assim, abordagens moleculares, como a metagenômica e o DNA *metabarcoding*, permitem acessar a diversidade taxonômica e funcional dos ambientes, a partir da obtenção de traços de DNA ambiental (*environmental* DNA, ou eDNA), possibilitando a detecção de assinaturas moleculares. Além do eDNA, outras metodologias permitem a obtenção de outras macromoléculas, como RNA e proteínas, a partir de amostras de água, solo ou outros tipos de sedimento, ampliando as possibilidades de inferências funcionais para avaliação do *status* ambiental, o que é útil, principalmente, para o monitoramento de áreas conservadas e em processo de recuperação.

O DNA *metabarcoding* vem sendo considerado um método rápido e eficiente para o levantamento e o monitoramento da biodiversidade para inferências ecológicas e de composição taxonômica, pois permite a identificação simultânea de múltiplas espécies com base no sequenciamento em massa de DNA barcodes de uma amostra ambiental por meio de abordagens NGS (e.g., Deiner *et al.* 2017, Rupert *et al.* 2019, Lunghi *et al.* 2022). Para a identificação taxonômica, os códigos de barra de DNA obtidos, que são sequenciados massiva e simultaneamente, são comparados a um banco de dados preestabelecido de referências genéticas de espécies do ambiente estudado. De modo geral, resultados obtidos por diversos autores têm mostrado que o DNA *metabarcoding* é uma ferramenta poderosa e versátil para caracterizar e avaliar a biodiversidade de ambientes diversos de modo rápido e eficaz. Assim, o uso dessa ferramenta molecular possibilita, de forma não invasiva, contribuir com a redução de custos e o aumento da objetividade para o monitoramento e identificação de ocorrências de táxons críticos, mesmo nos hábitats com baixa acessibilidade (Cowart *et al.* 2015, Fahner *et al.* 2016).

2.2.2 Exemplos atuais

Cavernas são frequentemente ambientes enclausurados e podem contribuir para a preservação, a longo prazo, do DNA no ambiente, que em outras situações poderia ser mais rapidamente degradado, lavado ou muito disperso para ser detectado. Portanto, o DNA *metabarcoding* pode ser aplicado com dois objetivos distintos em estudos de monitoramento e diagnóstico. Uma primeira abordagem está associada a um diagnóstico não

ecosystems, in addition to being their support base, and the presence of multicellular organisms cannot necessarily be detected by methods based on visual perception or direct sampling in the habitats in which they occur. Thus, molecular approaches, such as metagenomics and DNA *metabarcoding*, allow access to the taxonomic and functional diversity of environments, based on the obtaining of traces of *environmental* DNA (eDNA), enabling the detection of molecular signatures. In addition to eDNA, other methodologies allow other macromolecules to be obtained, such as RNA and proteins, from samples of water, soil or other types of sediment, expanding the possibilities of functional inferences for assessing environmental *status*, which is useful, mainly, for monitoring conserved areas and those in the process of recovery.

DNA *metabarcoding* has been considered a fast and efficient method for surveying and monitoring biodiversity for ecological and taxonomic composition inferences, as it allows the simultaneous identification of multiple species based on the mass sequencing of DNA barcodes from an environmental sample through Next Generation Sequencing NGS approaches (e.g., Deiner *et al.* 2017, Rupert *et al.* 2019, Lunghi *et al.* 2022). For taxonomic identification, the obtained DNA barcodes, which are sequenced massively and simultaneously, are compared to a pre-established database of genetic references for species from the studied environment. In general, the results obtained by several authors have shown that DNA *metabarcoding* is a powerful and versatile tool for quickly and effectively characterizing and assessing the biodiversity of diverse environments. Thus, the use of this molecular tool makes it possible, in a non-invasive way, to contribute to cost reduction and increased objectivity for monitoring and identifying occurrences of critical taxa, even in habitats with low accessibility (Cowart *et al.* 2015, Fahner *et al.* 2016).

2.2.2 Current example

Caves are often enclosed environments that can contribute to the long-term preservation of DNA in the environment, which in other situations could be more quickly degraded, washed away or dispersed too much to be detected. Therefore, DNA *metabarcoding* can be applied with two distinct objectives in monitoring and diagnostic studies. The first approach is associated with a non-specific diagnosis of subterranean

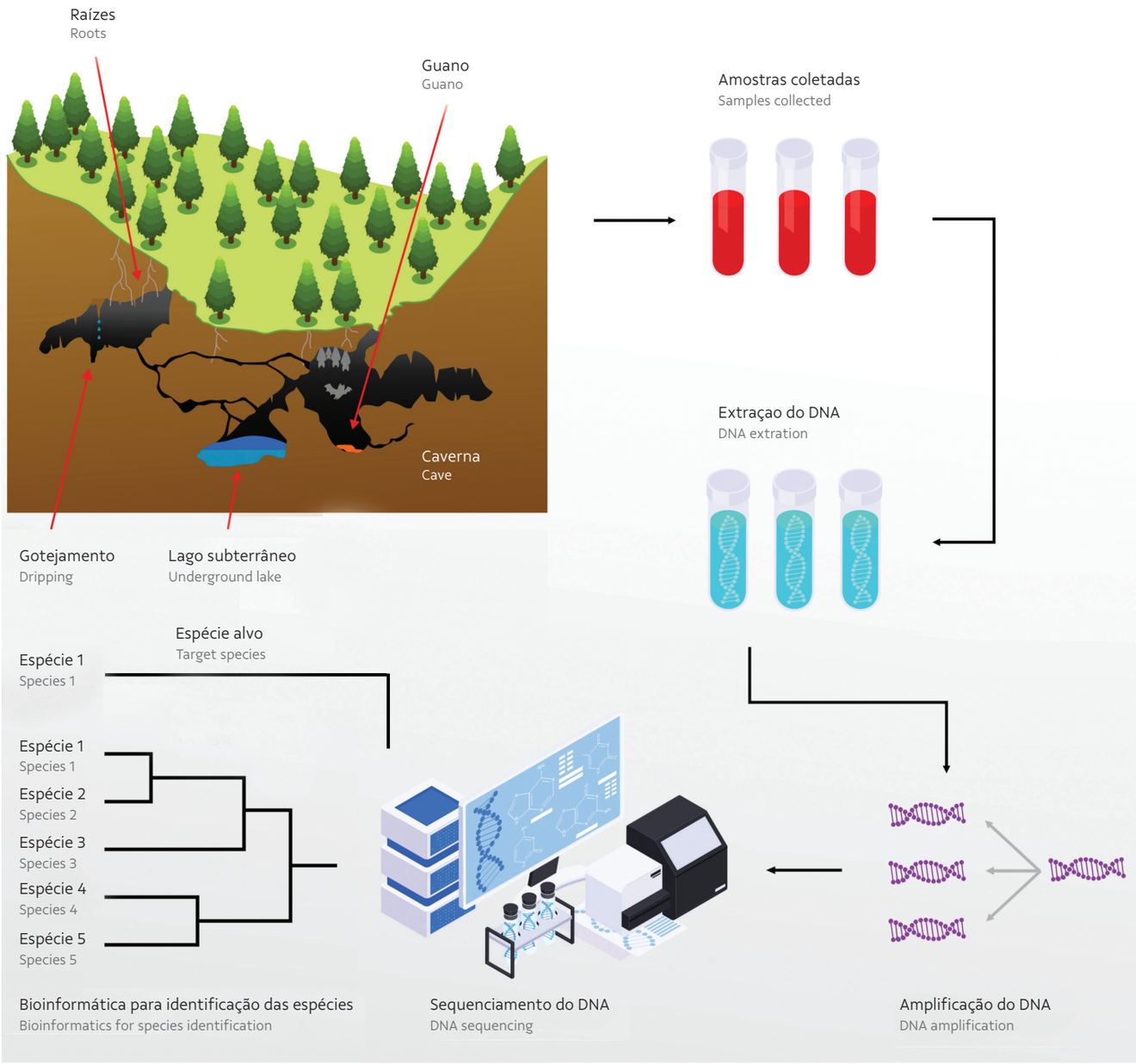


Figura 3: Fluxo de trabalho convencional para uso de DNA Ambiental (eDNA) aplicado a estudos subterrâneos e possíveis resultados.
Figure 3: A conventional eDNA workflow applied to subterranean studies and possible results.

específico da biodiversidade subterrânea, onde o objetivo é identificar o maior número possível de espécies presentes na caverna estudada. Já uma segunda aplicação permite a busca de um táxon específico, direcionando a aplicação do método para identificar se uma espécie já conhecida está ou não presente em uma caverna. Uma revisão recente sobre o tema, feita por Saccò e colaboradores (2022), traz uma grande variedade de exemplos sobre o uso dessa técnica em ambientes subterrâneos. Abaixo, temos adicionalmente mais alguns exemplos.

Alguns estudos têm utilizado amostras do ar para o diagnóstico da fauna de morcegos abrigados em cavernas, com resultados semelhantes àqueles obtidos a partir de levantamentos fotográficos e com capturas ativas, e até mesmo identificando a presença de DNA de espécies ainda não registradas a partir dessas técnicas tradicionais (Garrett *et. al.* 2023a, 2023b). Ainda considerando estudos associados a morcegos, uma abordagem recente está utilizando marcadores moleculares individuais a partir da genotipagem de fezes de morcegos, utilizando microssatélites para identificar e monitorar a ocupação e movimentação de indivíduos da espécie *Macroderma gigas* (Dobson, 1880), conhecida como morcego fantasma (*ghost bat*), em cavernas na região de Pilbara, oeste australiano (Bradley *et al.* 2023). Esta abordagem tem ajudado a identificar razões sexuais em populações cavernícolas (Ottewell *et al.* 2020), além de fornecer informações sobre os padrões de movimentação e eventos de dispersão de média e longa distância (Ottewell *et al.* 2019).

West e colaboradores (2020) conduziram um levantamento com DNA *metabarcoding* ambiental em um conjunto de 23 cavernas localizadas na Ilha Christmas com o objetivo de avaliar sua composição da fauna aquática (estigofauna). A partir de coletas de seis amostras de um litro de água e uma amostra de sedimento por caverna, o estudo detectou uma grande diversidade de cordados, cnidários, poríferos, artrópodes, moluscos, anelídeos e briozoários pertencentes a 115 taxa de 71 famílias e 60 ordens. Uma parte dos taxa foram identificados até o nível de Espécies (37,4%), mas a maior parte não teve uma identificação específica, ficando em níveis superiores de Gênero (20,8%), Ordem (22,6%), Família (17,5%) e Classe (1,7%). O estudo demonstrou que as taxas de detecção de espécies (riqueza) foram superiores àquelas de estudos que utilizaram métodos convencionais na mesma região, mesmo considerando expedições com duração similar de tempo, evidenciando a eficiência do método com ganho de tempo e custos associados

biodiversity, where the objective is to identify as many species as possible present in the studied cave. The second application allows the search for a specific taxon, directing the application of the method to identify whether or not a known species is present in a cave. A recent review on the subject, carried out by Saccò *et al.* (2022), provides a wide variety of examples of the use of this technique in subterranean environments. Below, we provide some additional examples.

Some studies have used air samples to diagnose bat faunas sheltering in caves, with results similar to those obtained from photographic surveys and active captures, while even identifying the presence of DNA from species not yet recorded using these traditional techniques (Garrett *et. al.* 2023a, 2023b). Still considering studies associated with bats, a recent approach used individual molecular markers from the genotyping of bat feces. These microsatellites were used to identify and monitor the occupation and movement of individuals of the species *Macroderma gigas* (Dobson, 1880), known as the *ghost bat*, in caves in the Pilbara region of western Australia (Bradley *et al.* 2023). This approach has helped to determine sex ratios of cave populations (Ottewell *et al.* 2020) and provided information on movement patterns and medium- and long-distance dispersal events (Ottewell *et al.* 2019).

West and collaborators (2020) conducted an eDNA *metabarcoding* survey of a set of 23 caves located on Christmas Island with the aim of assessing their aquatic fauna composition (stygofauna). The collection of six one-liter water samples and one sediment sample per cave allowed the detection of a great diversity of chordates, cnidarians, poriferans, arthropods, molluscs, annelids and bryozoans belonging to 115 taxa of 71 families and 60 orders. Some of the taxa were identified to the species level (37.4%), but most were identified at higher levels, namely genus (20.8%), order (22.6%), family (17.5%) and class (1.7%). The study achieved higher species detection rates (richness) than studies using conventional methods in the same region, even considering expeditions of similar duration, thereby demonstrating the efficiency of the method with savings in time and costs associated with previous surveys. Furthermore,

aos levantamentos realizados anteriormente. Além disso, o uso de DNA *metabarcoding* permitiu a detecção de algumas espécies alvo que não foram observadas mesmo em extensas expedições anteriores, como espécies de ostrácodes e camarões.

Além dos levantamentos para o diagnóstico das comunidades cavernícolas, a utilização do DNA ambiental vem sendo bastante empregada no monitoramento específico de espécies subterrâneas. Vários exemplos, especialmente de espécies aquáticas, estão presentes na literatura, incluindo a busca e ampliação de novos registros de espécies de crustáceos, peixes e salamandras (Niemiller et. al 2018, White et. al 2020, DiStefano *et al.* 2020, Capo *et al.* 2021, Hashemzadeh Segherloo *et al.* 2021). Um estudo conduzido por Gorički e colaboradores (2017) com a célebre salamandra cavernícola *Proteus anguinus* Laurenti, 1768, utilizou amostras de água de cavernas e poços localizados na Eslovênia, Bosnia Herzegovina e Montenegro para mapear a distribuição da espécie na paisagem, incluindo uma avaliação sobre variações de populações pigmentadas e despigmentadas da espécie. Os resultados comprovaram que o uso da técnica de DNA ambiental ampliou significativamente a capacidade de detecção do *Proteus* nas águas subterrâneas. Além da ampliação do conhecimento da distribuição da espécie, o fato de terem identificado pela primeira vez a presença de DNA das duas variantes (pigmentada e despigmentada) em um mesmo local, é um dos raros casos de ocorrência sintópica de linhagens subterrâneas e intimamente relacionadas. Esses resultados, viabilizados apenas em função do uso da técnica de DNA ambiental, contribuem significativamente para a compreensão dos mecanismos de especiação e diferenciação dentro do ambiente subterrâneo.

Os exemplos citados acima ajudam a compreender como o DNA ambiental e a técnica de DNA *metabarcoding* podem contribuir para os estudos associados aos ecossistemas subterrâneos. Dentre as diversas vantagens, esta técnica permite que se busque por espécies que, por vezes, podem ser de difícil detecção, seja pela baixa abundância populacional, seja pela dificuldade de acesso ao habitat específico. Além disso, o monitoramento de espécies sensíveis, para as quais coletas sucessivas não são recomendadas pelo risco de afetar o equilíbrio populacional, pode ser viabilizado a partir de amostras de água ou sedimento, permitindo a identificação da permanência da espécie em uma caverna, mesmo sem seu registro visual direto.

the use of DNA *metabarcoding* allowed the detection of some target species that had not been previously observed, even by extensive expeditions, such as ostracod and shrimp species.

In addition to surveys for the diagnosis of cave communities, eDNA has also been widely used in the specific monitoring of subterranean species. Several examples, especially of aquatic species, are present in the literature, including the search for and acquisition of new records of crustacean, fish and salamander species (Niemiller *et al*. 2018, White et. al. 2020, DiStefano *et al*. 2020, Capo *et al.* 2021, Hashemzadeh Segherloo *et al*. 2021). A study conducted by Gorički and collaborators (2017) with the famous cave salamander *Proteus anguinus* Laurenti, 1768, used water samples from caves and wells located in Slovenia, Bosnia Herzegovina and Montenegro to map the distribution of the species in the landscape and assess variation in pigmented and depigmented populations of the species. The results demonstrated that the eDNA technique significantly increased the capacity to detect *Proteus* in groundwater. In addition to expanding knowledge of the species' distribution, the identification, for the first time, of the presence of DNA from both variants (pigmented and depigmented) in the same location represents one of the rare cases of syntopic occurrence of closely related subterranean lineages. These results, made possible only by using the eDNA technique, contributed significantly to understanding the mechanisms of speciation and differentiation within the subterranean environment.

The examples cited above show how eDNA and the DNA *metabarcoding* techniques can contribute to studies associated with subterranean ecosystems. Among its many advantages, the techniques allows searching for species that can sometimes be difficult to detect, either due to low population abundance or difficulty in accessing its specific habitat. In addition, the monitoring of sensitive species, for which successive collections are not recommended due to the risk of affecting population balance, can be made possible using water or sediment samples to identify their presence in a cave, even without direct visual records.

2.2.3 Aplicações potenciais

Considerando os exemplos já citados, fica evidente que as técnicas de DNA *metabarcoding* e de DNA ambiental aplicam-se facilmente a diagnósticos biológicos de comunidades ou ao monitoramento da presença e distribuição de espécies no ambiente subterrâneo, especialmente daquelas aquáticas. No entanto, as aplicações potenciais vão além desses exemplos. Saccò e colaboradores (2022) destacam que *o eDNA pode ajudar a preencher as lacunas dos métodos tradicionais de amostragem para: 1) identificar espécies não descritas, independentemente da nomenclatura informal ou ad hoc, 2) ampliar o conhecimento dos limites das espécies e distribuição geográfica, 3) melhorar a detecção de espécies subterrâneas raras e não descritas cientificamente (por exemplo, dispersores ativos), 4) ser aplicado a uma ampla gama de habitats, 5) detectar a fauna em todos os estágios da história de vida do organismo, independentemente do gênero e do estágio da história de vida (uma vez que a identificação geralmente depende de caracteres morfológicos de um sexo específico e estágios da vida adulta), e 6) facilitar a detecção sem a necessidade de coleta de espécies que estão frequentemente ameaçadas ou em perigo*. A implementação dessas técnicas, associadas a objetivos bem estabelecidos, pode promover oportunidades de geração de conhecimento sem precedentes com o uso de técnicas tradicionais. Cabe agora a identificação dos casos de interesse e a aplicação experimental com o objetivo de desenvolver ainda mais os métodos.

2.2.4 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para o uso

A grande variedade de aplicações futuras das técnicas de DNA *metabarcoding* e DNA ambiental abre uma oportunidade sem igual para expandir o conhecimento sobre a biodiversidade subterrânea de cavernas no Brasil. No entanto, a implementação dessas técnicas ainda tem desafios importantes para a sua ampla utilização. Dentre eles estão:

- Degradação do DNA presente no ambiente, que varia com uma série de fatores externos associados ao substrato (ar, sedimento, água), às condições ambientais (temperatura, umidade, UV, pH...), à presença de microrganismos e, até mesmo, à espécie origem do DNA. Assim, protocolos específicos precisam ser desenvolvidos, testados e compartilhados, ampliando a capacidade de aplicação dos métodos ao longo do tempo;

2.2.3 Potential applications

Considering the aforementioned examples, it is clear that DNA metabarcoding and eDNA techniques can be easily applied to the biological diagnosis of communities or to monitoring the presence and distribution of species in the subterranean environment, especially aquatic species. However, the potential applications go beyond these examples. Saccò and collaborators (2022) highlight that "*eDNA can help fill gaps in traditional sampling methods by: 1) identifying undescribed species, regardless of informal or ad hoc nomenclature; 2) expanding knowledge of species limits and geographic distribution; 3) improving the detection of rare and scientifically undescribed subterranean species (e.g., active dispersers); 4) allowing the investigation of a wide range of habitats; 5) detecting fauna in all life history stages and regardless of sex (since identification often relies on morphological characters of a specific sex and adult life stages); and 6) facilitating detection without the need to collect species that are often threatened or endangered*". The implementation of these techniques, associated with well-established objectives, can promote opportunities for unprecedented knowledge generation. It is now up to the identification of cases of interest and experimental application with the aim of further developing these methods.

2.2.4 Limitations, challenges and development needs for use

The wide range of future applications of DNA *metabarcoding* and eDNA techniques opens an unparalleled opportunity to expand knowledge about the subterranean biodiversity of Brazilian caves. However, the implementation of these techniques still faces significant challenges for their widespread use, including the following:

- Degradation of DNA present in the environment, which varies with a series of external factors associated with the substrate (air, sediment, water), environmental conditions (temperature, humidity, UV, pH etc.), presence of microorganisms and even source species of the DNA. Therefore, specific protocols need to be developed, tested and shared to expand the application capacity of the methods over time.

- Existência de marcadores moleculares adequados ao grupo de interesse. Em muitos casos o uso de marcadores universais dificulta a identificação de espécies presentes no ecossistema, exigindo o desenvolvimento de marcadores específicos para uma fauna ainda pouco conhecida. O desenho de marcadores específicos para os grupos cavernícolas permitirá uma detecção cada vez mais aprimorada, o que ampliará também as possibilidades de uso das técnicas em questão;
- A delimitação de espécies: Após as leituras dos metabarcodes, são geradas informações de biodiversidade a partir das chamadas Unidades Taxonomicamente Operacionais (OTUs). Em teoria, cada OTU reflete um haplótipo ou variante de espécie e pode ser representada por muitos milhares de leituras, dependendo da presença do organismo original no ambiente amostrado. No entanto, espécies cavernícolas, especialmente as troglóbias que passaram por longos processos evolutivos e longos períodos de isolamento populacional, as taxas evolutivas e o limite de similaridade apropriado para agrupamentos são desconhecidas. Estudos específicos com espécies troglóbias possibilitarão, com o tempo, a identificação dos parâmetros corretos para a delimitação segura das espécies, viabilizando, assim, resultados mais precisos;
- Biblioteca de referência de barcode: A presença de uma biblioteca de referência de barcodes é essencial para a utilização ampla da técnica, uma vez que a identificação específica depende de sequências previamente depositadas nas bibliotecas de referência, como *GenBank* e o *Barcode of Life Data System* (BOLD). A ausência de referências limita as análises de identificação de OTUs, que tem importante utilidade na avaliação da biodiversidade, mas que não permite a identificação específica de espécies. Isso posto, para a fauna subterrânea e não subterrânea, o número de espécies desconhecidas *versus* espécies conhecidas é inumerável (Guzik *et al.*, 2011, Trontelj *et al.*, 2009, Trontelj e Fišer, 2009), especialmente se considerarmos ambientes tropicais de megadiversidade como o Brasil. Para ampliar a aplicabilidade das técnicas de *metabarcoding*, é necessário que haja investimento na geração de bases de referências genéticas de espécies cavernícolas. Essas bases devem, sempre que possível, estar vinculadas a estudos morfológicos e à descrição taxonômica formal das espécies, o que ampliará a qualidade dos resultados dos DNA *metabarcoding*.

- Existence of molecular markers appropriate for the group of interest. In many cases, the use of universal markers makes it difficult to identify species present in an ecosystem, and so specific markers need to be developed for fauna that is still little known. The design of specific markers for cave groups will allow for increasingly improved detection and expand the possibilities of using the techniques in question.
- Species delimitation: after reading metabarcodes, biodiversity information is generated from the so-called Operational Taxonomic Units (OTUs). In theory, each OTU reflects a haplotype or species variant that can be represented by many thousands of readings, depending on the presence of the original organism in the sampled environment. However, for cave species, especially troglobites that have undergone long evolutionary processes and long periods of population isolation, evolutionary rates and the appropriate similarity threshold for grouping are unknown. Specific studies with troglobitic species will, over time, make it possible to identify the correct parameters for the safe delimitation of species, thus enabling more accurate results.
- Barcode reference library: the presence of a barcode reference library is essential for the widespread use of the techniques, since specific identification depends on sequences previously deposited in reference libraries, such as *GenBank* and the *Barcode of Life Data System* (BOLD). The lack of references limits the analysis of OTU identification, which is important for assessing biodiversity, and does not allow for the specific identification of species. That said, the number of unknown species *versus* known species for subterranean and non-subterranean fauna is innumerable (Guzik *et al.*, 2011, Trontelj *et al.*, 2009, Trontelj and Fišer, 2009), especially for megadiverse tropical environments such as in Brazil. Investment in the generation of genetic reference databases for cave species is necessary to expand the applicability of *metabarcoding* techniques. These databases should, whenever possible, be linked to morphological studies and formal taxonomic descriptions of species, which will increase the quality of *DNA metabarcoding* results.

Como conclusão, os métodos de DNA *metabarcoding* e de DNA ambiental aqui apresentados e suas aplicações podem ampliar de forma significativa a capacidade e a velocidade de geração de conhecimento sobre a biodiversidade subterrânea. No entanto, os desafios ainda existentes exigem uma avaliação cuidadosa do uso desses métodos não como uma solução única, mas como uma oportunidade de aplicação em associação a outros métodos de inventário e monitoramento dos ecossistemas subterrâneos, considerando as vantagens e desvantagens de cada um deles.

3 PERSPECTIVAS PARA O USO DE NOVAS FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICAL PARA O MONITORAMENTO BIOLOGICO DE CAVERNAS FERRÍFERAS

O uso de Inteligência Artificial (IA) no monitoramento de cavernas oferece inúmeras possibilidades para aprimorar a eficiência dos processos e aumentar a segurança nas operações em torno do patrimônio espeleológico. Ao integrar tecnologias avançadas de análise de dados, detecção de anomalias, modelagem preditiva e automação, a IA pode transformar a maneira como as cavernas são monitoradas. Sua aplicação abrange não apenas a análise dos dados gerados pelos monitoramentos, mas também a geração de informações ambientais para o diagnóstico da fauna. Um exemplo disso são sites e aplicativos que utilizam a inteligência artificial para fazerem o reconhecimento autônomo de espécies por meio de análises morfológicas ou bioacústicas, como o Pl@ntNet (https://identify.plantnet.org), iNaturalist (https://www.inaturalist.org) e o PlantSnap (https://www.plantsnap.com), Merlin Bird ID (https://merlin.allaboutbirds.org) e o SonoChiro (https://sonochiro.biotope.fr/en/).

Com o avanço dessas tecnologias, espera-se que a IA desempenhe um papel cada vez mais importante nos estudos espeleológicos, especialmente naquelas áreas relacionadas ao monitoramento de atividades potencialmente prejudiciais aos ecossistemas subterrâneos. A seguir, exploraremos algumas das possibilidades de aplicação da Inteligência Artificial nos monitoramentos biológicos de cavernas.

3.1. Inteligência artificial (IA) aplicada aos estudos bioacústicos

3.1.1 Introdução ao método

A bioacústica, estudo dos sons de organismos vivos, une ecologia, conservação e etologia. Métodos manuais de processamento e análise de registros bioacústicos, eficazes

In conclusion, the DNA metabarcoding and eDNA techniques and applications presented here can significantly increase the capacity and speed of generating knowledge about subterranean biodiversity. However, the challenges that still exist require a careful evaluation of the use of these methods not as a single solution, but as an opportunity for application in association with other methods of inventory and monitoring of subterranean ecosystems, considering the advantages and disadvantages of each.

3 PROSPECTS FOR THE USE OF NEW ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS FOR BIOLOGICAL MONITORING OF FERRIFEROUS CAVES

The use of Artificial Intelligence (AI) in cave monitoring offers countless possibilities to improve process efficiency and increase safety in operations around speleological heritage. By integrating advanced data analysis, anomaly detection, predictive modeling and automation technologies, AI can transform the way caves are monitored. Its application includes not only the analysis of data generated by monitoring, but also the generation of environmental information for faunal diagnoses. An example of this are websites and applications that use AI to autonomously recognize species through morphological or bioacoustic analyses, such as Pl@ntNet (https://identify.plantnet.org), iNaturalist (https://www.inaturalist.org) and PlantSnap (https://www.plantsnap.com), and Merlin Bird ID (https://merlin.allaboutbirds.org) and SonoChiro (https://sonochiro.biotope.fr/en/), respectively.

As these technologies advance, AI is expected to play an increasingly important role in speleological studies, especially in areas related to the monitoring of activities that are potentially harmful to subterranean ecosystems. Below, we explore some of the possibilities for applying AI to the biological monitoring of caves.

3.1 ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IA) APPLIED TO BIOACOUSTIC STUDIES

3.1.1 Introduction to the method

Bioacoustics – the study of the sounds of living organisms – combines ecology, conservation, and ethology. Manual methods

em pequena escala, limitam-se frente a grandes volumes de dados, vitais para estudos de maior abrangência (Farina, 2017). A inteligência artificial (AI – Artificial Intelligence), via aprendizado de máquina (ML – Machine Learning) e aprendizado profundo (DL – Deep Learning), tem revolucionado essa área, automatizando tarefas como reconhecimento de espécies e monitoramento ambiental, entre outras (Stowell *et al.*, 2014).

3.1.2 Exemplos atuais – Aplicações de IA na Bioacústica: Reconhecimento Automático de Espécies

O reconhecimento automatizado de espécies de morcegos, por exemplo, via técnicas baseadas em IA profunda, como as Redes Neurais Convolucionais (CNNs – Convolutional Neural Networks), destaca-se no campo da bioacústica. Essas técnicas identificam espécies com alta precisão através da extração de características acústicas complexas dos dados, mesmo em condições adversas, como uma alta taxa de ruídos na gravação (Kahl *et al.*, 2021), o que as tornam cruciais para monitorar ecossistemas. Estudos comprovam sua superioridade em eficiência e precisão, permitindo análise em tempo real de grandes volumes de dados (Knight *et al.*, 2017). Adicionalmente, esse mesmo tipo de abordagem auxilia na conservação das mais variadas espécies ameaçadas, como anfíbios, aves e mamíferos que habitam áreas remotas de difícil acesso, onde métodos

of processing and analyzing bioacoustic recordings are effective on a small scale but are limited when dealing with large volumes of data, which are vital for more comprehensive studies (Farina, 2017). Artificial intelligence via machine learning and deep learning has revolutionized this area by automating tasks such as species recognition and environmental monitoring, among others (Stowell *et al.*, 2014).

3.1.2.Current examples – Bioacoustic Applications of AI: Automated Species Recognition

The automated recognition of bat species, for example, via deep AI-based techniques such as Convolutional Neural Networks (CNNs), stands out in the field of bioacoustics. These techniques identify species with high precision by extracting complex acoustic features from data, even under adverse conditions, such as high noise levels in recordings (Kahl *et al.*, 2021), which makes them crucial for monitoring ecosystems. Studies have proven their superiority in efficiency and precision, allowing real-time analysis of large volumes of data (Knight *et al.*, 2017). Additionally, this same type of approach helps in the conservation of the most varied endangered species, such as amphibians, birds and mammals that inhabit remote areas that

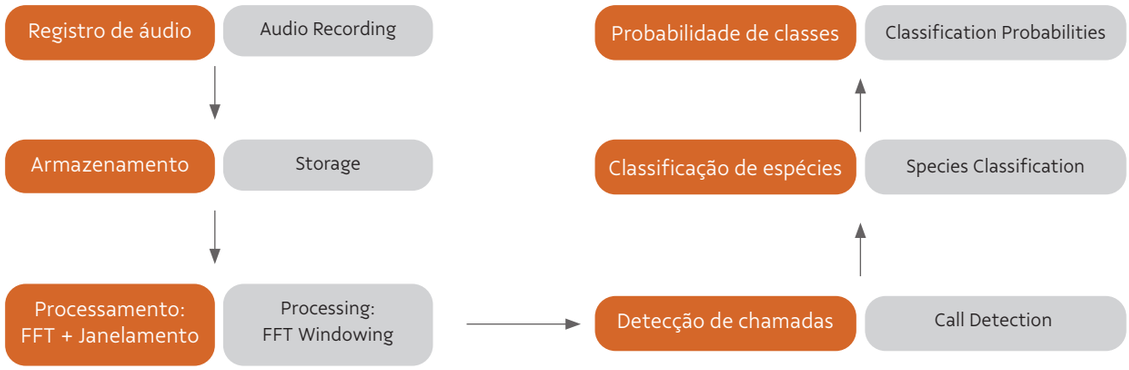


Figura 4: Etapas para o processamento e modelagem com dados bioacústicos, onde o registro sonoro é armazenado, processado com uma Transformada de Fourier Rápida (FFT – Fast Fourier Transform), janelado e, então, filtrado por chamados de ecolocalização válidos e, posteriormente, classificado em diferentes espécies, retornando no final a probabilidade obtida para cada espécie.

Figure 4: Steps for processing and modeling with bioacoustic data, where the sound record is stored, processed with Fast Fourier Transform (FFT), windowed and then filtered by valid echolocation calls and subsequently classified into different species, returning at the end the probability obtained for each species.

tradicionais de monitoramento são difíceis de serem aplicados ou mesmo inviáveis (Kitzes *et al.*, 2019).

A figura a seguir mostra um *pipeline* padrão de processamento de dados bioacústicos com a finalidade de usar a IA para detecção e classificação de espécies de morcegos.

Análise Comportamental e Comunicação Animal:

A análise do comportamento animal e da comunicação entre espécies tem sido outro campo de aplicação significativo da IA na bioacústica. Os animais utilizam uma variedade de sons para se comunicar, desde o canto de pássaros até os complexos sons emitidos por cetáceos. Tradicionalmente, a análise desses sons era limitada pela capacidade humana de interpretar padrões acústicos, mas os avanços recentes dos modelos automatizados têm permitido uma análise muito mais precisa e em larga escala.

Algoritmos de aprendizado de máquina, como os modelos de aprendizado supervisionado e não supervisionado, são agora empregados para identificar e classificar diferentes tipos de vocalizações. Por exemplo, em estudos com aves, algoritmos foram utilizados para identificar padrões de canto associados à territorialidade, corte e alerta (Stowell & Plumbley, 2014). Em cetáceos, modelos de IA têm ajudado a decodificar as complexas sequências de sons que esses animais usam para se comunicar em ambientes marinhos (Mellinger *et al.*, 2011). Essas análises podem revelar não apenas o comportamento individual, mas também a dinâmica social dentro das populações, fornecendo *insights* valiosos para a biologia da conservação e a ecologia comportamental.

Monitoramento e Detecção de Mudanças Ambientais:

A IA também tem desempenhado um papel crucial no monitoramento de mudanças ambientais através da análise de paisagens sonoras. O conceito de ecologia de paisagens sonoras refere-se ao estudo de sons em um ecossistema como um todo, considerando tanto os sons biológicos (biophony), como os sons gerados pelo ambiente não vivo (geophony) e os sons humanos (anthrophony) (Farina & Gage, 2017). Algoritmos de IA, especialmente aqueles baseados em aprendizado profundo, são capazes de processar vastos conjuntos de dados acústicos para detectar mudanças sutis nas paisagens sonoras, que podem indicar alterações na biodiversidade ou a introdução de espécies invasoras.

Por exemplo, a detecção de mudanças nos padrões acústicos de um ambiente pode ser utilizada para monitorar o impacto

are difficult to access and where traditional monitoring methods are difficult to apply or even unfeasible (Kitzes *et al.*, 2019).

The figure below shows a standard bioacoustic data processing pipeline for the purpose of using AI for bat species detection and classification.

Behavioral Analysis and Animal Communication

A The analysis of animal behavior and interspecies communication has been another significant field of application of AI in bioacoustics. Animals use a variety of sounds to communicate, from birdsong to the complex sounds emitted by cetaceans. Traditionally, the analysis of these sounds was limited by the human ability to interpret acoustic patterns, but recent advances in automated models have enabled much more accurate and large-scale analysis.

Machine learning algorithms, such as supervised and unsupervised learning models, are now employed to identify and classify different types of vocalizations. For example, in studies of birds, algorithms have been used to identify song patterns associated with territoriality, courtship, and alarm (Stowell & Plumbley, 2014). Likewise, AI models have helped decode the complex sequences of sounds that cetaceans use to communicate in marine environments (Mellinger *et al.*, 2011). Such analyses can reveal not only individual behavior but also social dynamics within populations, which provides valuable *insights* for conservation biology and behavioral ecology.

Monitoring and Detection of Environmental Changes

Artificial intelligence has also played a crucial role in monitoring environmental changes through soundscape analysis. The concept of soundscape ecology refers to the study of sounds in an ecosystem as a whole, considering not only biological sounds (biophony), but also sounds generated by the non-living environment (geophony) as well as human sounds (anthrophony) (Farina & Gage, 2017). AI algorithms, especially those based on deep learning, are capable of processing vast acoustic data sets to detect subtle changes in soundscapes, which may indicate changes in biodiversity or the introduction of invasive species.

For example, detecting changes in the acoustic patterns of an environment can be used to monitor the impact of human

de atividades humanas, como desmatamento ou urbanização, sobre a biodiversidade local (Gasc *et al.*, 2018). Além disso, a IA tem sido aplicada no monitoramento de ecossistemas marinhos, onde sensores acústicos subaquáticos capturam sons que são analisados por algoritmos para identificar mudanças nas populações de cetáceos e outros organismos (Hildebrand, 2009). Esse tipo de monitoramento contínuo e em tempo real oferece uma ferramenta poderosa para a conservação e a gestão ambiental, permitindo intervenções rápidas em resposta a mudanças ambientais.

O uso do monitoramento bioacústico em cavernas está associado especialmente aos morcegos, sendo um método mais utilizado nas regiões temperadas (Frick *et al.* 2020, Matthäus *et al.* 2022), e ainda pouco explorado nos ambientes tropicais. A utilização de equipamentos que gravam a bioacústica de morcegos é uma técnica não invasiva que permite capturar informações de indivíduos ou espécies que habitam partes difíceis de serem acessadas, identificar espécies que são muito parecidas morfologicamente, ou ainda realizar monitoramentos com estimativas populacionais (Revilla-Martin *et al.* 2021).

3.1.2 Aplicações potenciais

Com o avanço contínuo do poder computacional e a crescente eficiência de novos modelos de IA, especialmente em aprendizado profundo, prevê-se a redução do pré-processamento em registros bioacústicos. Atualmente, a conversão de dados temporais de alta dimensionalidade em imagens é necessária para modelos como CNNs, amplamente usados na área. Treinar algoritmos em registros sonoros de alta resolução exige poder computacional significativo, onerando o seu desenvolvimento. A expectativa é que modelos futuros lidem diretamente com dados brutos, agilizando o processo e reduzindo custos, sem sacrificar a eficiência.

3.1.3 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para o uso

Apesar das aplicações de IA no campo da bioacústica terem demonstrado grandes resultados até aqui, diversas barreiras ainda precisam ser superadas para que essas tecnologias possam ser amplamente adotadas de forma eficaz. Um dos principais desafios é a qualidade e a quantidade de dados de treinamento disponíveis. Modelos de IA, especialmente os baseados em aprendizado profundo, requerem grandes volumes de amostras para treinamento e otimização de seus

activities, such as deforestation or urbanization, on local biodiversity (Gasc *et al.*, 2018). In addition, AI has been applied to monitoring marine ecosystems, where underwater acoustic sensors capture sounds that are analyzed by algorithms to identify changes in the populations of cetaceans and other organisms (Hildebrand, 2009). This type of continuous, real-time monitoring offers a powerful tool for conservation and environmental management, as it enables rapid interventions in response to environmental changes.

The use of bioacoustic monitoring in caves is especially associated with bats and has been more widely used in temperate regions (Frick *et al.* 2020, Matthäus *et al.* 2022), while still little explored in tropical environments. The use of equipment that records the bioacoustics of bats is a non-invasive technique that allows capturing information about individuals or species that inhabit areas that are difficult to access, the identification species that are very similar morphologically, or even monitoring with population estimates (Revilla-Martin *et al.* 2021).

3.1.2 Potential applications

With the continuous advancement of computing power and the increasing efficiency of new AI models, especially with deep learning, pre-processing of bioacoustic recordings can be expected to be reduced. Currently, the conversion of high-dimensional temporal data into images is necessary for models such as CNNs, which are widely used in the field. Training algorithms on high-resolution sound recordings requires significant computing power, making their development more expensive. The expectation is that future models will deal directly with raw data, speeding up the process and reducing costs, without sacrificing efficiency.

3.1.3 Limitations, challenges and development needs for use

Although AI applications in the field of bioacoustics have demonstrated great results thus far, several barriers still need to be overcome before these technologies can be widely adopted effectively. One of the main challenges is the quality and quantity of available training data. AI models, especially those based on deep learning, require large volumes of samples for training and optimization of their parameters. However,

parâmetros. No entanto, a obtenção de dados bioacústicos de alta qualidade é frequentemente uma tarefa desafiadora, especialmente em ambientes naturais onde o ruído de fundo pode interferir significativamente nas gravações (Joly *et al.*, 2016). Avaliações sobre o uso de identificações automatizadas de espécies de morcegos, a partir de softwares comerciais, apontaram importantes deficiências na capacidade de detecção ou na detecção correta de espécies em diferentes situações, especialmente em regiões tropicais por trabalharem a partir de bibliotecas limitadas para o reconhecimento das espécies (Hintze *et al.* 2016, Russo & Voigt 2016).

Além disso, a generalização dos modelos de IA para diferentes contextos e ambientes é uma preocupação. Modelos treinados em um conjunto de dados específicos podem não se comportar bem quando aplicados a um ambiente ou população diferentes, devido a variações nas condições acústicas ou nos padrões comportamentais das espécies. Isso limita a aplicabilidade dos modelos e exige esforços contínuos de re-treinamento e adaptação para garantir sua eficácia em novos cenários (Brosseau *et al.*, 2022).

4 OS GANHOS DA APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS E INOVAÇÕES METODOLÓGICAS NO MONITORAMENTO BIOESPELEOLÓGICO

O desenvolvimento de novas tecnologias e inovações pode trazer uma série de benefícios significativos para o monitoramento espeleológico, principalmente os vinculados a processos de licenciamento ambiental de empreendimentos, otimizando tanto a eficácia quanto a eficiência das atividades de controle ambiental no entorno do patrimônio espeleológico. De forma sintética, podemos resumir os ganhos de novas tecnologias e métodos nos monitoramentos bioespeleológicos como:

4.1. Principais ganhos

4.1.1 Coleta de dados mais segura, precisa e abrangente

Tecnologias como o DNA ambiental, a bioacústica e o PIT *tags* permitem a coleta de dados de forma ágil e com alta precisão e de maneira rápida e eficiente. Isso possibilita o monitoramento de regiões de difícil acesso, como áreas remotas ou de risco à saúde e à segurança das pessoas, sem a necessidade de intervenções humanas diretas, o que reduz custos e riscos. A possibilidade de captura indireta de informações a partir da bioacústica ou de DNA

obtaining high-quality bioacoustic data is often a challenging task, especially in natural environments where background noise can significantly interfere with recordings (Joly *et al.*, 2016). Evaluations of the automated identification of bat species, using commercial software, identified important deficiencies in the detection capacity or in the correct detection of species in different situations, especially in tropical regions, because they work from limited libraries for species recognition (Hintze *et al.*, 2016, Russo & Voigt, 2016).

Furthermore, the generalizability of AI models to different contexts and environments is a concern. Models trained on a specific dataset may not perform well when applied to a different environment or population, due to variations in acoustic conditions or species behavioral patterns. This limits the applicability of models and requires continuous retraining and adaptation efforts to ensure their effectiveness in new scenarios (Brosseau *et al.*, 2022).

4 GAINS FROM APPLYING NEW TECHNOLOGIES AND METHODOLOGICAL INNOVATIONS IN BIOSPELEOLOGICAL MONITORING

The development of new technologies and innovations can bring a series of significant benefits to speleological monitoring, especially when it is linked to environmental licensing processes for projects, as it optimizes both the effectiveness and efficiency of environmental control activities in the vicinity of speleological heritage. The gains of new technologies and methods in biospeleological monitoring can be summarized as follows:

4.1 MAIN GAINS

4.1.1 More secure, accurate and comprehensive data collection

Technologies such as eDNA, bioacoustics and PIT *tags* allow for the quick and efficient collection of data with high precision. This makes it possible to monitor areas that are difficult to access, such as remote places or those that pose a risk to people's health and safety, without the need for direct human intervention, which reduces costs and risks. The possibility of

ambiental reduz a necessidade de manipulação de indivíduos, reduzindo os riscos à fauna, potencialmente causados por esse manejo.

4.1.2 Monitoramento contínuo e em tempo real

O uso de sensores avançados, miniaturizados e conectados a sistemas de monitoramento remoto e "*big data*" (como os *PIT tags e aplicação de inteligência artificial*) permitem o acompanhamento contínuo de variáveis ambientais, como o comportamento diário de morcegos, contagem de indivíduos em populações e mudanças na composição específica das comunidades cavernícolas. Isso possibilita a detecção imediata de alterações ou anomalias no ambiente, facilitando a adoção de medidas corretivas rápidas e eficazes.

4.1.3 Análise preditiva e gestão proativa

O uso de inteligência artificial (IA), via aprendizado de máquina, aprendizado profundo e análise de "*big data*", permite processar grandes volumes de dados históricos e em tempo real, identificando padrões e tendências ambientais, como a mudança na composição e frequência de ocupação de espécies em diferentes ambientes. Isso pode ser utilizado para prever impactos ambientais futuros, possibilitando a implementação de estratégias de gestão proativa que minimizem os danos às comunidades cavernícolas antes que se tornem críticos.

4.1.4 Redução de custos e aumento da eficiência

A automação do monitoramento por meio de DNA ambiental e bioacústica, associados a tecnologias de IoT (Internet das Coisas[1]), pode reduzir a necessidade de monitoramento manual, que é mais demorado e dispendioso. Além disso, essas tecnologias permitem uma coleta de dados mais eficiente, com menor margem de erro, contribuindo para uma gestão do patrimônio espeleológico mais econômica e eficaz.

4.1.5 Melhoria na tomada de decisão

As ferramentas tecnológicas oferecem uma visão integrada e detalhada do território, permitindo que os gestores ambientais e os tomadores de decisão obtenham uma compreensão mais completa dos impactos das atividades potencialmente poluidoras sobre as comunidades associadas ao patrimônio espeleológico. A análise espacial e temporal dos dados facilita a identificação de áreas críticas e a priorização de ações corretivas, além de possibilitar o planejamento mais preciso de ações de mitigação.

indirectly capturing information from bioacoustics or eDNA reduces the need for handling individuals, thereby reducing the risks to fauna potentially caused by such handling.

4.1.2 Continuous and real-time monitoring

The use of advanced, miniaturized sensors connected to remote monitoring systems and "*big data*" (such as *PIT tags and the application of AI*) allows for the continuous monitoring of environmental variables, such as the daily behavior of bats, the number of individuals in populations and changes in the species composition of cave communities. This enables the immediate detection of changes or anomalies in the environment, thereby facilitating the adoption of rapid and effective corrective measures.

4.1.3 Predictive analysis and proactive management

The use of AI, via machine learning, deep learning and "*big data*" analysis, allows large volumes of historical and real-time data to be processed, and the identification of environmental patterns and trends, such as changes in the composition and frequency of species occupancy in different environments. This can be used to predict future environmental impacts, enabling the implementation of proactive management strategies that minimize damage to cave communities before they become critical.

4.1.4 Cost reduction and increased efficiency

Monitoring automation through eDNA and bioacoustics, combined with IoT (Internet of Things[1]), can reduce the need for manual monitoring, which is more time-consuming and costly. In addition, these technologies allow for more efficient data collection, with a lower margin of error, contributing to more economical and effective management of speleological assets.

4.1.5 Improved decision making

Technological tools provide an integrated and detailed view of a territory, allowing environmental managers and decision-makers to obtain a more complete understanding of the impacts of potentially polluting activities on communities associated with speleological heritage. Spatial and temporal analysis of data facilitates the identification of critical areas and the prioritization of corrective actions, in addition to enabling more precise planning of mitigation actions.

4.1.6 Maior transparência e conformidade regulamentar

Tecnologias de monitoramento e *reporting* em tempo real podem ser usadas para trazer mais segurança e certeza de que os empreendimentos estão cumprindo as regulamentações de forma rigorosa. A transparência proporcionada por essas ferramentas também pode melhorar a confiança da sociedade e das partes interessadas, como comunidades locais e órgãos governamentais, em relação às práticas ambientais da empresa.

4.1.7 Integração de diversos tipos de dados

O desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial (IA), via aprendizado de máquina e aprendizado profundo, permite a integração de diferentes tipos de dados — como sons, fotos, dados genéticos, meteorológicos, entre outros — em uma plataforma única. Isso facilita a análise holística dos potenciais impactos ambientais e a elaboração de planos de ação mais eficazes e coordenados.

4.1.8 Apoio ao cumprimento de objetivos do Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (PAN Cavernas do Brasil)

A adoção de tecnologias inovadoras contribui para o alinhamento do desenvolvimento econômico com os objetivos do Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (PAN Cavernas do Brasil), especialmente em relação ao Objetivo 1 "*Prevenção e redução dos impactos das atividades e empreendimentos efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores do patrimônio espeleológico brasileiro*", ajudando as empresas a monitorar e reduzir seus impactos sobre o patrimônio espeleológico de forma mais eficaz. A coleta de dados em tempo real e a análise preditiva permitem a implementação de soluções mais ágeis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As novas tecnologias e métodos não apenas melhoram a precisão e a eficiência do monitoramento espeleológico em empreendimentos potencialmente poluidores, como também oferecem ferramentas para uma gestão mais sustentável e proativa dos potenciais impactos ambientais. Elas possibilitam uma abordagem mais inteligente e integrada para enfrentar os desafios da mineração conciliada à preservação do patrimônio espeleológico, contribuindo para a conservação das cavernas e produção mineral sustentável, ao mesmo tempo que promovem a transparência e a conformidade com as normativas ambientais.

4.1.6 Increased transparency and regulatory compliance

Real-time monitoring and reporting technologies can be used to provide greater security and certainty that companies are strictly complying with regulations. The transparency provided by these tools can also improve the trust of society and stakeholders, such as local communities and government agencies, in the company's environmental practices.

4.1 7 Integration of different types of data

The development of AI algorithms, via machine learning and deep learning, enables the integration of different types of data — such as sounds, photos, genetic data, meteorological data, among others — into a single platform. This facilitates the holistic analysis of potential environmental impacts and the development of more effective and coordinated action plans.

4.1.8 Support for achieving the objectives of "National Action Plan for the Conservation of Brazilian Speleological Heritage (PAN Cavernas do Brasil)"

The adoption of innovative technologies contributes to the alignment of economic development with the objectives of the Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (PAN Cavernas do Brasil), especially in relation to Objective 1 "*Prevention and reduction of the impacts of activities and enterprises that are actually or potentially polluting or degrading Brazilian speleological heritage*", helping companies to more effectively monitor and reduce their impacts on speleological heritage. Real-time data collection and predictive analysis allow for the implementation of more agile solutions.

5 FINAL CONSIDERATIONS

New technologies and methods not only improve the accuracy and efficiency of speleological monitoring for potentially polluting projects, they also provide tools for more sustainable and proactive management of potential environmental impacts. They enable a smarter and more integrated approach to addressing the challenges of mining while preserving speleological heritage by contributing to cave conservation and sustainable mineral production, all while promoting transparency and compliance with environmental regulations.

Esses avanços tecnológicos, quando bem implementados, têm o potencial de transformar a mineração em uma atividade mais sustentável e responsável. No entanto, há que se considerar, como apresentado em cada um dos monitoramentos explorados neste capítulo, as limitações, os desafios e as necessidade de desenvolvimento para ampla implantação de cada uma das tecnologias ou inovações aqui propostas. A decisão da adoção dos monitoramentos tradicionais, já experimentados e consolidados, conjugados a novos métodos ou novas tecnologias, deve ser adotada com parcimônia, considerando as limitações de cada método e a compreensão de qual situação permite cada uma das abordagens. Seguramente, a possibilidade de conjugação dos métodos tradicionais aos inovadores influenciará no desenvolvimento mais ágil das novas abordagens, acelerando os ganhos potenciais para a previsão e mitigação dos impactos da mineração sobre o patrimônio espeleológico.

6 AGRADECIMENTOS

Este capítulo é resultado da compilação de ideias e resultados de projetos de pesquisa e estudos de monitoramento ambientais desenvolvidos pela Vale que contaram com a colaboração de um grande grupo de pessoas e empresas. Assim, agradecemos em especial às equipes da BioEspeleo Consultoria Ambiental, da Fishtag Consultoria e Assessoria Ambiental Ltda., do Instituto Tecnológico Vale e da Gerência de Espeleologia da Vale que participaram ativamente nas discussões, experimentos e aplicações dos métodos aqui apresentados. Aos revisores Matheus Henrique Simões e Robson de Almeida Zampaulo, agradecemos as importantes contribuições no processo de revisão do capítulo.

These technological advances, when well implemented, have the potential to transform mining into a more sustainable and responsible activity. However, it is necessary to consider, as presented in each of the monitoring methods explored in this chapter, the limitations, challenges and development needs for the widespread implementation of each of the technologies or innovations proposed here. The decision to adopt already tried and tested traditional monitoring methods, combined with new methods or technologies, should be made with caution, considering the limitations of each method and understanding which situation allows each of the approaches. The possibility of combining traditional and innovative methods will certainly influence the more agile development of new approaches, accelerating the potential gains for predicting and mitigating the impacts of mining on speleological heritage.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

This chapter is the result of a compilation of ideas and results from research projects and environmental monitoring studies developed by Vale, which had the collaboration of a large group of people and companies. Thus, we would especially like to thank the teams from BioEspeleo Consultoria Ambiental, Fishtag Consultoria e Assessoria Ambiental Ltda. Instituto Tecnológico Vale and Gerência de Espeleologia da Vale who actively participated in the discussions, experiments and applications of the methods presented here. We would also like to thank the reviewers Matheus Henrique Simões and Robson de Almeida Zampaulo for their important contributions in the process of revising the chapter.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ADAMS, R. A.; HAYES, M. A. Water availability and successful lactation by bats as related to climate change in arid regions of western North America. **Journal of Animal Ecology**, v. 77, n. 6, p. 1115–1121, 2008. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01447.x

ADAMS, E. R.; AMMERMAN, L. K. A serpentine antenna configuration for passive integrated transponder tag readers used at bat roosts. **The Southwestern Naturalist**, v. 60, p. 393–397, 2015. DOI: 10.1894/0038-4909-60.4.393

ANTONELLI, A. *et al*. Amazonia is the primary source of Neotropical biodiversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America - PNAS**, v. 115, n. 23, p. 6034-6039, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1713819115

BARCLAY, R. M. R.; BELL, G. P. Marking and Observational Techniques. *In*: KUNZ, T. H.; PARSONS, S. (eds.). **Ecological and behavioral methods for the study of bats**. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, 1988. p. 59–76. (Observational Techniques).

BOITANI, L.; FULLER, T. K. (eds.). **Research techniques in animal ecology**: controversies and consequences. New York: Columbia University Press, Brigham, 2000.

BRADLEY, H. S. *et al*. A critical review of survey techniques and perceived threats for the threatened Pilbara ghost bat (*Macroderma Gigas*). **Journal of The Royal Society of Western Australia**, v. 106, p. 30–43, 2023. DOI: https://doi.org/10.70880/001c.128232

BRITZKE, E. R.; GUMBERT, M. W.; HOHMANN M.G. Behavioral response of bats to passive integrated transponder tag reader arrays placed at cave entrances. **Journal of Fish and Wildlife Management**, v. 5, n. 1, p. 146–150, 2014. DOI: 10.3996/082012-JFWM-065

BROSSEAU, M. *et al*. Standardizing bioacoustic monitoring with machine learning: Applications to species at risk across Canada. **Ecological Indicators**, v. 132, 108275, 2022.

BULLEN, R. D.; REIFFER, S. A record of movement of a Pilbara leaf-nosed bat between distant diurnal roosts using PIT tags. **Australian Mammalogy**, v. 42, n. 1, p. 119–121, 2019. DOI: https://doi.org/10.1071/AM18054

BULLEN, R.; REIFFER, S. Measurement of roost entrance activity of Pilbara leaf-nosed bats (Rhinonicteris aurantia) using passive integrated transponder tags. **Australian Mammalogy**, v. 43, n. 3, p. 311–318, 2020. DOI: https://doi.org/10.1071/AM20054

CAPO, E. *et al*. Droplet digital PCR applied to environmental DNA, a promising method to estimate fish population abundance from humic-rich aquatic ecosystems. **Environmental DNA**, v. 3, n. 2, p. 343–352, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/edn3.115

CHENG, T. L. The scope and severity of white-nose syndrome on hibernating bats in North America. **Conservation Biology**, v. 35, n. 5, p. 1586–1597, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/cobi.13739

COWART, D. A. *et al*. Metabarcoding is powerful yet still blind: a comparative analysis of morphological and molecular surveys of seagrass communities. **Plos One**, v. 10, n. 2, 2015. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117562

DECHMANN, D. K. N. *et al*. Tracking post-hibernation behavior and early migration does not reveal the expected sex-differences in a "female-migrating" bat. **Plos One**, v. 9, n. 12, p. 1–20, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114810

DEINER, K. *et al*. Long-range PCR allows sequencing of mitochondrial genomes from environmental DNA. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, n. 12, p. 1888–1898, 2017. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12836

DEWALT, R. E. DNA barcoding: a taxonomic point of view. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 30, n. 1, p. 174–181, 2011. DOI: https://doi.org/10.1899/10-021.1

DISTEFANO, R. J. *et al*. Preliminary investigation of the critically imperiled Caney Mountain cave crayfish Orconectes stygocaneyi (Hobbs III, 2001)(Decapoda: Cambaridae) in Missouri, USA. **Freshwater Crayfish**, v. 25, n. 1, p. 47–57, 2020. DOI: 10.5869/fc.2020.v25-1.047

EGERT-BERG, K. *et al*. Resource ephemerality drives social foraging in bats. **Current Biology**, v. 28, n. 22, p. 3667–3673, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.09.064

ELLISON, L. E. **Summary and analysis of the U.S. Government bat banding program**. Reston: U.S. Geological Survey, 2008. (USGS. Science for a changing world). Disponível em: http://pubs.usgs.gov/of/2008/1363/pdf/OF08-1363_508.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

FAGERSTONE, K. A.; JOHNS, B. E. Transponders as permanent identification markers for domestic ferrets, blackfooted ferrets, and other wildlife. **Journal of Wildlife Management**, v. 51, n. 2, p. 294–297, 1987. DOI: 10.2307/3801005

FAHNER, N. A. *et al*. Large-scale monitoring of plants through environmental DNA metabarcoding of soil: recovery, resolution, and annotation of four DNA markers. **Plos One**, v.11, n. 6, 2016. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157505

FARINA, A.; GAGE, S. H. (eds). **Ecoacoustics**: the ecological role of sounds. [*S. l.*]: John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119230724

FINCH, D. *et al*. Modelling the functional connectivity of landscapes for greater horseshoe bats *Rhinolophus ferrumequinum* at a local scale. **Landscape Ecology**, v. 35, p. 577–589, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10980-019-00953-1

FORBES, E. *et al*. Locomotor behaviour promotes stability of the patchy distribution of slugs in arable fields: tracking the movement of individual *Deroceras reticulatum*. **Pest Management Science**, v. 76, n. 9, p. 2944-2952, 2020. DOI: 10.1002/ps.5895

FRICK, W. F. *et al*. Pathogen dynamics during invasion and establishment of white-nose syndrome explain mechanisms of host persistence. **Ecology**, v. 98, n. 3, p. 624–631, 2017. DOI: 10.1002/ecy.1706

FRICK, W. F.; KINGSTON, T.; FLANDERS, J. A review of the major threats and challenges to global bat conservation. **Ann. N.Y. Acad. Sci.**, v. 1469, p. 5–25, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/nyas.14045

GALLÃO, J. E.; BICHUETTE, M. E. Brazilian obligatory subterranean fauna and threats to the hypogean environment. **ZooKeys**, v. 746, p. 1–23, 2018. DOI: https://doi.org/10.3897/zookeys.746.15140

GARRETT, N. R. *et al*. Airborne eDNA documents a diverse and ecologically complex tropical bat and other mammal community. **Environmental DNA**, v. 5, n. 2, 2023. DOI: 10.1002/edn3.385

GARRETT, N. R. et al. (2022). Out of thin air: surveying tropical bat roosts through air sampling of eDNA. **PeerJ**., 2023. DOI: 10.1101/2022.11.07.515479

GARROWAY, C. J.; BRODERS, H. G. Nonrandom association patterns at northern long-eared bat maternity roosts. **Canadian Journal of Zoology**, v. 85, p. 956–964, 2007.

GASC, A. *et al*. (2018). Acoustic indices for biodiversity assessments: analyses of bias based on simulated bird assemblages and recommendations for field surveys. **Biological Conservation**, v. 191, p. p. 306–312, 2015. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.06.018

GIBBONS, J. W.; ANDREWS, K. M. PIT tagging: simple technology at

its best. **BioScience**, v. 54, n. 5, p. 447–454, 2004. DOI: https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0447:PTSTAI]2.0.CO;2

GORIČKI, Š. *et al*. Environmental DNA in subterranean biology: Range extension and taxonomic implications for Proteus. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–11, 2017. DOI: 10.1038/srep45054.

GUZIK, M. T. *et al*. Is the Australian subterranean fauna uniquely diverse? **Invertebrate Systematics**, v. 24, p. 407–418, 2011. DOI: 10.1071/IS10038

HAGEN, M.; WIKELSKI, M.; KISSLING, W. D. Space use of bumblebees (*Bombus* spp.) revealed by radio-tracking. **Plos One**, v. 6, n. 5, p. 1–10, 2011. DOI: 10.1371/journal.pone.0019997

HASHEMZADEH SEGHERLOO, I. *et al*. eDNA metabarcoding as a means to assess distribution of subterranean fish communities: Iranian blind cave fishes as a case study. **Environmental DNA**, v. 4, n. 2, p. 402–416, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/edn3.264

HE, X. *et al*. Assessment of flight activity and homing ability in Asian and European honey bee species, Apis cerana and Apis mellifera, measured with radio frequency tags. **Apidologie**, v. 44, p. 38–51, 2013. DOI: 10.1007/s13592-012-0156-7

HEBERT, P. D. N.; RATNASINGHAM, S.; DEWAARD, J. R. Barcoding animal life: cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species. **Proc. Biol. Sci.**, v. 270, supl. 1, p. S96–S99, 2003. DOI: 10.1098/rsbl.2003.0025

HILDEBRAND, J. A. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. **Marine Ecology Progress Series**, v. 395, p. 5–20, 2009. DOI: 10.3354/meps08353

HINTZE, F. *et al*. Uma nota de precaução sobre a identificação automática de chamados de ecolocalização de morcegos no Brasil. **Bol. Soc. Bras. Mastozool.**, v. 77, p. 163–171, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319722633. Acesso em: 25 jul. 2024.

HOU, L.; VERDIRAME, M.; WELCH JR., K. C. Automated tracking of wild hummingbird mass and energetics over multiple time scales using radio frequency identification (RFID) technology. **Journal of Avian Biology**, v. 46, p. 1–8, 2015. DOI: 10.1111/jav.00478

HOYT, J. R. *et al*. 2019. Field trial of a probiotic bacteria to protect bats from white-nose syndrome. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-45453-z

JACKSON, R. **Hibernation activity and the susceptibility of southeastern bats to Pseudogymnoascus destructans, the causal agent of white-nose syndrome**. 2019. 101 f. Thesis (Master of Science Degree) – University of Tennessee, Knoxville, 2019. Disponível em: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/5486. Acesso em: 25 jul. 2024.

JACKSON, R. T. *et al*. Emergence activity at hibernacula differs among four bat species affected by white-nose syndrome. **Ecology and Evolution**, v. 12, n. 7, p. 1–11, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.9113

JOLY, A. *et al*. LifeCLEF 2016: Multimedia Life Species Identification Challenges. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE CLEF ASSOCIATION, 7.; Experimental IR meets multilinguality, multimodality, and interaction, Évora, 2016. **Conference proceedings** [ ]. Évora: CLEF, 2016. p. 286–310. (Lecture Notes in Computer Science). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-44564-9_26

JOLY, P. 2019. Behavior in a changing landscape: using movement ecology to inform the conservation of pond-breeding amphibians. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 7, p. 1–17, 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00155

KAHL, S. et al. BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. **Ecological Informatics**, v. 61, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101236

KENWARD, R. E. **A manual for wildlife radio tagging**. London: Academic Press, 2000. ISBN: 0 124 97781 2.

KERTH, G.; KÖNIG, B. Transponder and an infrared-videocamera as methods in a feldstudy on the social behaviour of Bechstein-s bats (Myotis bechsteinii). **Myotis**, v. 34, p. 27–34, 1996.

KERTH, G.; RECKARDT, K. Information transfer about roosts in female Bechstein's bats: an experimental field study. **Proc. R. Soc. Lond. B.**, v. 270, n. 1514, p. 511–515, 2003. DOI: http://doi.org/10.1098/rspb.2002.2267

KITZES, J. *et al*. Deep learning for bioacoustics: a review of methods and applications. **Ecological Informatics**, v. 53, p. 100–113, 2019.

KNIGHT, E. C. *et al*. Recommendations for acoustic recognizer performance assessment with application to five common automated signal recognition programs. **Avian Conservation and Ecology**, v. 12, n. 2, art. 14, 2017. DOI: https://doi.org/10.5751/ACE-01114-120214

KUNZ, T. H.; BROCK, C. E. A comparison of mist nets and ultrasonic detectors for monitoring flight activity of bats. **Journal of Mammalogy**, v. 56, n. 4, p. 907–911, 1975. DOI: https://doi.org/10.2307/1379662

KUNZ, T. H.; WEISE, C. D. Methods and devices for marking bats. In: KUNZ, T. H.; PARSONS, S. (eds.). **Ecological and behavioral methods for the study of bats**. 2nd edition. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2009. p. 36–56. ISBN 978-0-8018-9147-2

LORCH, J. M. *et al*. Experimental infection of bats with Geomyces destructans causes white-nose syndrome. **Nature**, v. 480, p. 376–378, 2011. DOI: 10.1038/nature10590

LUNGHI. E. *et al*. Environmental DNA of insects and springtails from caves reveals complex processes of eDNA transfer in soils. **Science of The Total Environment**, v. 826, p. 154022, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154022

MATTHÄUS, L.; KUGELSCHAFTER, K.; FIETZ, J. Evaluation of different monitoring methods at maternity roosts of greater mouse-eared bats (Myotis myotis). **Biodiversity and Conservation**, v. 31, p. 1289–1312, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-022-02389-7

MELLINGER, D. K. *et al*. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. **Oceanography**, v. 20, n. 4, p. 36–45, 2007. DOI: https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.03.

MELLO, M. A. R. Radiotelemetria aplicada a pesquisas sobre morcegos. *In*: REIS, N. R. *et al*. (eds.). **Técnicas de estudo aplicadas aos mamíferos**

silvestres brasileiros. 2 ed. Rio de Janeiro: Technical Books, 2014.

METEYER, C. U. et al. Histopathologic criteria to confirm white-nose syndrome in bats. **Journal of Veterinary Diagnostic Investigation**, v. 21, n. 4, p. 411–414, 2009. DOI: https://doi.org/10.1177/104063870902100401

NIEMILLER, M. L. *et al*. Evaluation of eDNA for groundwater invertebrate detection and monitoring: a case study with endangered *Stygobromus* (Amphipoda: Crangonyctidae). **Conservation Genetics Resources**, v. 10, p. 247–257, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s12686-017-0785-2

NORQUAY, K. J. O.; WILLIS, C. K. R. Hibernation phenology of *Myotis lucifugus*. **Journal of Zoology**, v. 294, p. 85–92, 2014. DOI: https://doi.org/10.1111/jzo.12155

O'SHEA T.J. *et al*. Recruitment in a Colorado population of big brown bats: breeding probabilities, litter size, and first-year survival. **Journal of Mammalogy**, v. 91, n. 2, p. 418–428, 2010. DOI: 10.1644/08-MAMM-A-295.1

OTTEWELL, K. *et al*. Development and optimisation of molecular assays for microsatellite genotyping and molecular sexing of non-invasive samples of the ghost bat, Macroderma gigas. **Molecular Biology Reports**, v. 47, p. 5635–5641, 2020. https://doi.org/10.1007/s11033-020-05544-x

OTTEWELL, K.; THAVORNKANLAPACHAI, R.; MCARTHUR, S. **Ghost bat (Macroderma gigas) genetic monitoring**: South Flank 2019. Kensington: Department of Biodiversity, Conservation and Attractions, 2021. Report.

PORTUGAL, S. J.; WHITE, C. R. Miniaturization of biologgers is not alleviating the 5% rule. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 7, p. 1662–1666, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.13013

REVILLA-MARTÍN, N. et al. Monitoring cave-dwelling bats using remote passive acoustic detectors: a new approach for cave monitoring. **Bioacoustics**, v. 30, n. 5, p. 527–542, 2020. DOI: 10.1080/09524622.2020.1816492

RIBEIRO, M. T.; SINGH, S.; GUESTRIN, C. "Why should I trust you?": explaining the predictions of any classifier. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 22., 2016, San Francisco. **Proceedings** [...]. San Francisco: ACM; SIGKDD, 2016. p. 1135-1144. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939778

ROELEKE, M. *et al*. Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-9, 2016. DOI: 10.1038/srep28961

RUPPERT, K. M.; KLINE, R. J.; RAHMAN, M. D. Past, present, and future perspectives of environmental DNA (eDNA) metabarcoding: a systematic review in methods, monitoring, and applications of global eDNA. **Global Ecology and Conservation**, v. 17, p. 1-29, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00547

RUSSO, D.; VOIGT, C. C. The use of automated identification of bat echolocation calls in acoustic monitoring: a cautionary note for a sound analysis. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 598–602, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.036

SACCÒ, M. *et al*. eDNA in subterranean ecosystems: Applications, technical aspects, and future prospects. **Science of The Total Environment,** v. 820, p. 1-14, 2002. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153223.

STOWELL, D.; PLUMBLEY, M. D. Automatic large-scale classification of bird sounds is strongly improved by unsupervised feature learning. **PeerJ**, v. 2, p. 1-31, 2014. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.488

SUBPROGRAMA de interface entre quiropterofauna e atividades de desmonte e maquinário. *In*: BIOESPELEO CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. **Plano de Gestão Espeleológica**: Projeto Serra Leste 10 MTPA: 2022. Lavras: BioEspeleo, 2023. p. 768-793. Relatório anual.

TRONTELJ, P. *et al*. A molecular test for cryptic diversity in ground water: how large are the ranges of macro-stygobionts? **Freshwater Biology**, v. 54, p. 727–744, 2009. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01877.x

TRONTELJ, P.; FIŠER, C. Perspectives: Cryptic species diversity should not be trivialised. **Systematics and Biodiversity**, v. 7, n. 1, p. 1–3, 2009. DOI: https://doi.org/10.1017/S1477200008002909

VAN HARTEN, E. *et al*. High detectability with low impact: optimizing large PIT tracking systems for cave-dwelling bats. **Ecology and Evolution**, v. 9: 10916–10928, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.5482

WEISS, K.; KHOSHGOFTAAR, T. M.; WANG, D. A survey of transfer learning. **Journal of Big Data**, v. 3, n. 9, p. 1-40, 2016. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-016-0043-6

WEST, K. M. *et al*. Under the karst: detecting hidden subterranean assemblages using eDNA metabarcoding in the caves of Christmas Island, Australia. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-15, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-78525-6

WHITE, N. E. *et al*. Detection of the rare Australian endemic blind cave eel (Ophisternon candidum) with environmental DNA: implications for threatened species management in subterranean environments. **Hydrobiologia**, v. 847, n. 5, p. 3201–321, 2020. DOI: 10.1007/s10750-020-04304-z

WIKELSKI, M. *et al*. Simple rules guide dragonfly migration. **Biology Letters**, v. 2, n. 3, p. 325–329, 2006. DOI: https://doi.org/10.1098/rsbl.2006.0487

WIKELSKI, M. *et al*. Large-range movements of neotropical orchid bees observed via radio telemetry. **Plos One**, v. 5, n. 5, p. 1–6, 2010. DOI:10.1371/journal.pone.0010738

WILD, T. A. *et al*. Micro-sized open-source and low-cost GPS loggers below 1 g minimise the impact on animals while collecting thousands of fixes. **Plos One**, v. 17, n. 6, p. 1-14, 2022. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267730

WINHOLD, L.; KURTA, A. Netting surveys for bats in the Northeast: differences associated with habitat, duration of netting, and use of consecutive nights. **Northeastern Naturalist**, v. 15, n. 2, p. 263-274, 2008. DOI: https://doi.org/10.1656/1092-6194(2008)15[263:NSFBIT]2.0.CO;2



11

Drone de espaço confinado mapeando uma caverna ferrífera /
Confined space drone mapping a ferriferous caves
Foto/Photo: Bruno F. de Aguiar

Desenvolvimento e aplicação de novos métodos e tecnologias para o monitoramento da integridade física de cavernas ferríferas

ADAM BARROS FERNANDES
LEANDRO ALVES CALDEIRA LUZZI
MAURI LOPES FERREIRA JUNIOR
RAMON ARAÚJO

1 INTRODUÇÃO

Monitoramentos de cavernas voltados para empreendimentos passíveis de licenciamento ambiental, tais como mineração, rodovias, ferrovias, linhas de transmissão de energia, são relativamente novos no Brasil, tendo iniciado em maior escala a partir da publicação do Decreto Federal nº 6.640 de 2008, que passou a permitir impactos negativos irreversíveis em cavernas, mediante licenciamento ambiental. Inovações como o uso de dados de escâner a laser 3D, *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*), veículos aéreos não tripulados (VANTs), sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG), aplicação da inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (*machine learning*) associada à análise de *big data* têm o potencial de transformar a forma como os dados ambientais são coletados, processados e interpretados. Esses progressos oferecem oportunidades inéditas para aprimorar a precisão, eficiência e abrangência das ações de monitoramento do patrimônio espeleológico em regiões com operações minerárias, ou outros tipos de empreendimentos potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas

Nesse contexto, este capítulo avalia o desenvolvimento e a aplicação dessas novas tecnologias no monitoramento do meio físico de cavernas inseridas em áreas de formações ferríferas. Atualmente, o monitoramento da integridade física das cavernas ferríferas sob influência de atividades e empreendimentos potencialmente poluidores é baseado, principalmente, no mapeamento e monitoramento geoestrutural, fotográfico e sismográfico.

As boas práticas atuais desses monitoramentos foram apresentadas em capítulos específicos deste livro. Neste capítulo apresentaremos como a utilização de diferentes tecnologias pode aumentar a eficiência e diminuir os impactos e os riscos do acesso frequente de diversos profissionais a esses ambientes. Serão apresentadas as vantagens, os desafios e a necessidade de desenvolvimento para ampla implantação. Além disso, discutimos como essas inovações podem contribuir para a preservação desses ambientes subterrâneos, enquanto permitem a implantação e operação de empreendimentos no entorno de cavernas com segurança e eficiência, principalmente operações minerárias associadas à produção do minério de ferro.

Development and application of new methods and technologies for monitoring the physical integrity of ferriferous caves

ADAM BARROS FERNANDES
LEANDRO ALVES CALDEIRA LUZZI
MAURI LOPES FERREIRA JUNIOR
RAMON ARAÚJO

1 INTRODUCTION

Cave monitoring for projects subject to environmental licensing, such as mining, highways, railways, and power transmission lines, is relatively new in Brazil. It began on a larger scale after the publication of Federal Decree No. 6,640 of 2008, which began to allow irreversible negative impacts on caves, subject to environmental licensing. Innovations such as the use of 3D laser scanning, LiDAR (Light Detection and Ranging), unmanned aerial vehicles (UAVs), remote sensing, and geographic information systems (GIS), along with the application of artificial intelligence (AI) and machine learning, associated with big data analysis, have the potential to transform the way environmental data is collected, processed, and interpreted. These advances offer unprecedented opportunities to improve the accuracy, efficiency, and scope of the monitoring of speleological heritage in regions with mining operations, or other types of projects that potentially pollute or degrade caves.

This chapter evaluates the development and application of these new technologies for monitoring the physical environment of caves located in areas of ferriferous formations. Currently, monitoring the physical integrity of ferriferous caves under the influence of potentially polluting activities and projects is based mainly on geostructural, photographic and seismographic mapping and monitoring.

Current best practices for these monitoring methods have been presented in specific chapters of this book. In the current chapter, we present how the use of different technologies can increase efficiency and reduce the impacts and risks of frequent access by several professionals to these environments. The advantages, challenges, and need for development for widespread implementation are also presented. In addition, we discuss how these innovations can contribute to the preservation of these underground environments, while allowing the implementation and operation of projects around caves with safety and efficiency, especially mining operations associated with the production of iron ore.

2 USO DE ESCÂNER A LASER, DRONE E ROBÔ PARA MAPEAMENTO DE FRAGILIDADES ESTRUTURAIS

2.1 Introdução aos métodos e aplicações atuais

Escâner a laser

A varredura a laser 3D em cavernas é uma tecnologia relativamente recente, com cerca de vinte anos, que se apresenta como uma solução inovadora, proporcionando dados inéditos e permitindo a criação de produtos mais precisos e detalhados. Essa tecnologia é compatível com diversos *softwares* e ambientes especializados, sendo útil para a apresentação dos ecossistemas cavernícolas a diferentes públicos, realização de mapeamentos geológicos e geotécnicos, cálculo de volume com elevada exatidão, avaliação de riscos operacionais em atividades subterrâneas, além de análises integradas ao meio biótico (Araújo, 2016).

Os escâneres a laser são usados para medir distâncias, calcular áreas e volumes, além de permitir a criação de mapas e modelos 3D detalhados do ambiente. Eles são capazes de gerar modelos tridimensionais precisos de cavernas, minas subterrâneas e tubulações, o que é essencial para a análise estrutural e planejamento de operações (Cosso *et al.*, 2014).

Em minas subterrâneas, o escâner a laser é utilizado para monitorar deslocamentos de paredes e tetos, detectando possíveis deformações ou deslocamentos que possam indicar riscos de desabamento de blocos de rocha. Com relação às cavernas, o método tem sido utilizado no mapeamento e monitoramento espeleológico, auxiliando no registro preciso do interior desse patrimônio natural, além de documentar a evolução dessas formações geológicas (Canevese *et al.*, 2009).

O escaneamento a laser 3D possibilita a reconstrução tridimensional das cavernas da forma mais fiel possível à realidade do ambiente, com uma precisão milimétrica. Além disso, em boas condições de iluminação, é possível gerar uma imagem digital em cores que reflete muito bem a realidade do ambiente. Por outro lado, os dispositivos para mapeamento 3D geralmente requerem um treinamento específico que pode ser complexo, além de demandar algumas horas ou até mesmo dias para o processamento da nuvem de pontos (Fernandes *et al.*, 2023). Outro ponto importante é que existem diversos tipos de equipamentos disponíveis no mercado, mas nem todos conseguem gerar dados capazes de suportar os objetivos de um monitoramento da integridade física.

Vale destacar que os principais objetivos do monitoramento da integridade física de cavernas utilizando o escâner a laser

2 LASER SCANNER, DRONE AND ROBOT USE FOR MAPPING STRUCTURAL FRAGILITIES

2.1 Introduction to current methods and applications

Laser scanner

The use of 3D laser scanning in caves is a relatively recent technology, around twenty years old, and presents itself as an innovative solution, providing unprecedented data and allowing the creation of more precise and detailed products. This technology is compatible with various specialized software and environments and is useful for presenting cave ecosystems to different audiences, performing geological and geotechnical mapping, calculating volumes with high accuracy, assessing operational risks, and performing integrated analyses of the biotic environment (Araújo, 2016).

Laser scanners are used to measure distances and calculate areas and volumes. They also allow the creation of detailed 3D maps and models of the environment. They are capable of generating accurate three-dimensional models of caves, underground mines and pipelines, which is essential for structural analysis and operations planning (Cosso *et al.*, 2014).

Laser scanners are used in underground mines to monitor the displacement of walls and ceilings to detect possible deformations or displacements that may indicate the risk for collapses of rock blocks. This method have also been used in caves for speleological mapping and monitoring, which helps to accurately record the interior of this natural heritage, in addition to documenting the evolution of these geological formations (Canevese *et al.*, 2009).

The use of 3D laser scanning enables the three-dimensional reconstruction of caves as faithfully as possible to the reality of the environment, with millimeter precision. Furthermore, under conditions of good lighting, it is possible to generate a color digital image in that reflects the reality of the environment very well. On the other hand, 3D scanning devices generally require specific training that can be complex, and demand a few hours or even days to process the produced point cloud (Fernandes *et al.*, 2023). Another important point is that there are several types of equipment available on the market, but not all of them can generate data capable of supporting the objectives of monitoring physical integrity.

The main objectives of monitoring the physical integrity of caves using laser scanners are to detect structural changes, as

são a detecção de alterações estruturais bem como da forma e dimensões das cavernas, prevenção de riscos geotécnicos (antecipar deslizamentos, colapsos ou outras instabilidades estruturais) e conservação (preservar os ecossistemas subterrâneos e o patrimônio geológico). Desse modo, as medições extremamente precisas realizadas por esse método permitem um monitoramento eficaz e a detecção precoce de anomalias. Outro fator importante é que a capacidade de coletar grandes volumes de dados em um curto período torna o método extremamente eficiente. Nas figuras a seguir são apresentadas imagens do uso do escâner a laser para mapeamento e monitoramento de cavernas inseridas em formações ferríferas e algumas nuvens de pontos geradas como resultado desse mapeamento (Figura 1 e Figura 2).

Além dos escâneres a laser convencionais e de mão, que necessitam ser operados por pessoas dentro das cavernas, já existem drones e robôs capazes de operar com sensores acoplados que conseguem gerar o mapeamento 3D detalhado das cavernas.

Drones de espaço confinado

Os drones são utilizados para realizar inspeções visuais em áreas de difícil acesso, sem colocar a vida humana em risco. Entre essas atividades, podemos citar: inspeções em galerias subterrâneas de mineração, exploração e mapeamento de áreas de difícil acesso, como cavernas e tubulações.

Vale destacar que além da inspeção visual, drones podem ser equipados com sensores para mapear a geometria interna de minas, cavernas ou tubulações, capturando dados de qualidade em áreas muitas vezes inacessíveis ao ser humano (Tabib *et al.*, 2022). Isso possibilita realizar o monitoramento da integridade física de cavernas utilizando este equipamento com escâner a laser acoplado, sendo uma aplicação interessante e desafiadora. Além disso, é um método que vem sendo testado e aprimorado cada vez mais, uma vez que oferece maior rapidez e segurança, quando comparamos com os levantamentos manuais em que pessoas são expostas aos riscos existentes dentro das cavernas (Risbøl & Gustavsen, 2018).

Por outro lado, os desafios para a operação de drones em tal ambiente residem na ausência de luminosidade, alta umidade, presença de material particulado em suspensão, drenagens subterrâneas, morfologia heterogênea desses ambientes, passagens estreitas entre câmaras e abismos profundos. Além das limitações de transmissão de dados e imagens e da necessidade de troca de baterias para fins de execução da atividade (Petráček *et al.*, 2021).

well as changes in the shape and dimensions of caves; prevent geotechnical risks by anticipating landslides, collapses or other structural instabilities; and preserve subterranean ecosystems and geological heritage. In this way, the extremely precise measurements performed by this method allow for effective monitoring and early detection of anomalies. Another important factor is that the ability to collect large volumes of data in a short period of time makes method extremely efficient. The following figures show images of the use of laser scanners for mapping and monitoring caves inserted in ferriferous formations and some point clouds generated as a result of this mapping (Figure 1 and Figure 2).

In addition to conventional and handheld laser scanners, which need to be operated by people inside the caves, there are already drones and robots capable of operating with attached sensors that can perform detailed 3D mapping of caves.

Drones in confined space

Drones are used to carry out visual inspections in hard-to-reach areas without putting human life at risk. These activities include inspections in subterranean mining galleries, the exploration and mapping of hard-to-reach areas, such as caves and pipelines.

In addition to visual inspection, drones can be equipped with sensors to map the internal geometry of mines, caves or pipelines, capturing quality data in areas that are often inaccessible to humans (Tabib *et al.*, 2022). This makes it possible to monitor the physical integrity of caves using this equipment with an attached laser scanner, which is an interesting and challenging application. The method has been increasingly tested and improved, since it offers greater speed and safety than do manual surveys in which people are exposed to the risks inside caves (Risbøl & Gustavsen, 2018).

On the other hand, the challenges for operating drones in such an environment lie in the lack of light, high humidity, presence of suspended particulate matter, underground drainage, heterogeneous morphology of these environments, narrow passages between chambers, and deep chasms. In addition, there are limitations of data and image transmission and the need to change batteries for the purpose of carrying out the activity (Petráček *et al.*, 2021).



Figura 1: A–B: Equipamento escâner a laser estático com captura de imagens fora e no interior de uma caverna. C–D: Utilização do escâner a laser portátil no interior de uma caverna ferrífera. Fotos: A–B: Acervo Vale, C–D: Adimir Rezende.

Figure 1: A–B: Static laser scanner equipment capturing images inside and outside a cave. C–D: Use of a portable laser scanner inside a ferriferous cave. Photos: A–B: Vale Collection, C–D: Adimir Rezende.

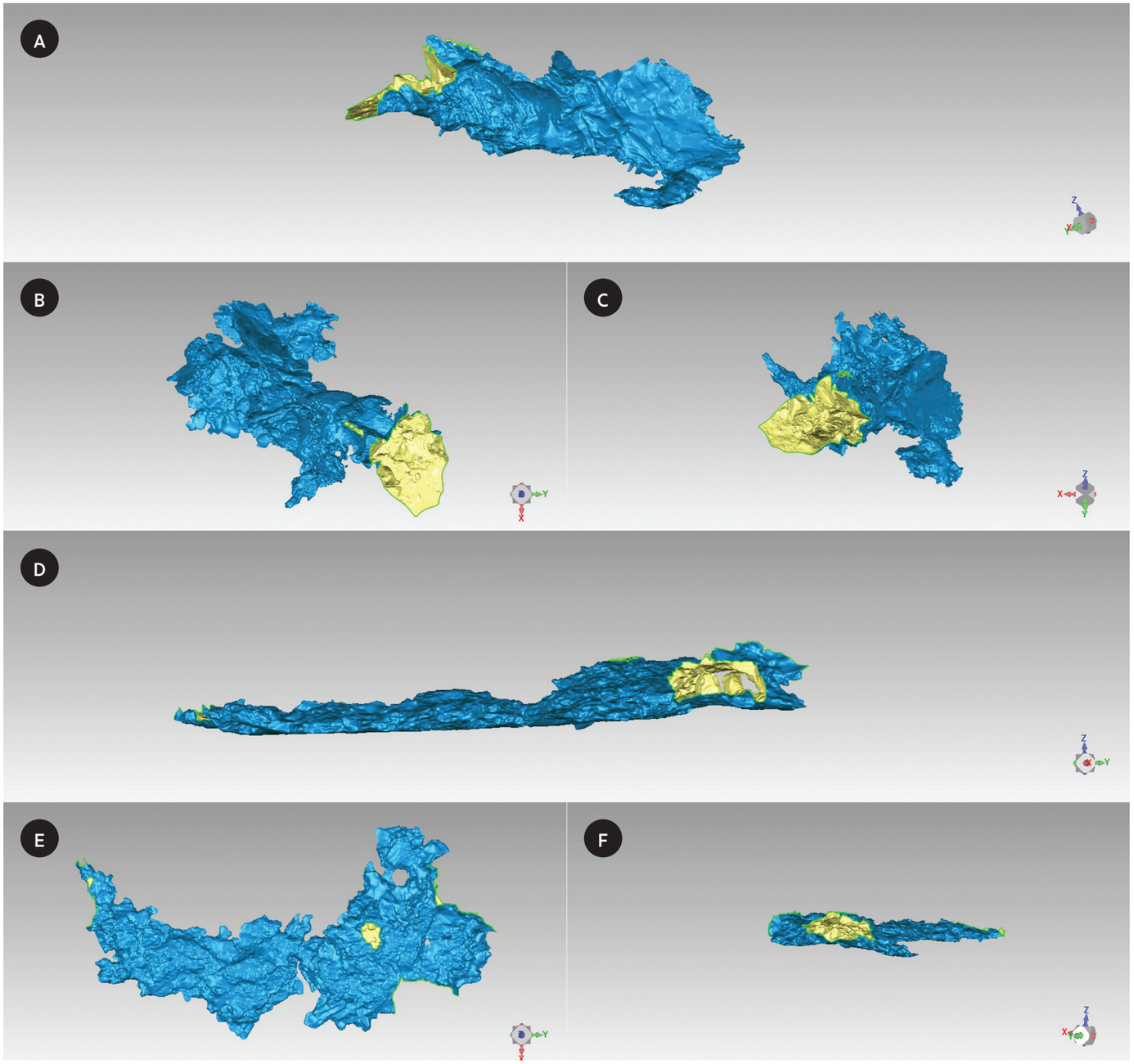


Figura 2: A–C) Modelo 3D gerado a partir da varredura com escâner a laser estático com captura de imagens na caverna BR_0034, localizada no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais. D–E) Modelo 3D gerado a partir da varredura com escâner a laser portátil na caverna TIRI_0095, localizada na região de Montes Claros, estado de Minas Gerais.

Figure 2: A–C) 3D model generated from scanning with a static laser scanner with image capture in cave BR_0034, located in Quadrilátero Ferrífero state of Minas Gerais. D–E) 3D model generated from scanning with a portable laser scanner in cave TIRI_0095, located in Montes Claros region, state of Minas Gerais.

No contexto espeleológico, os drones são importantes para impulsionar métodos exploratórios de última geração, com o intuito de fornecer recursos viáveis para as áreas de difícil acesso. Esses equipamentos são capazes de minimizar os riscos para os seres humanos, reduzindo a necessidade de escalar paredões, descer abismos profundos, nadar em cavernas inundadas, estar exposto a animais peçonhentos ou patógenos, ou até mesmo evitar o acesso a locais que possam ter gases nocivos aos seres humanos. Além disso, o uso dos drones permite uma redução nos impactos em ambientes subterrâneos decorrentes dos métodos de exploração tradicionais, tais como: preservação dos estratos sedimentares e recursos orgânicos dispostos no piso, depredação de espeleotemas, sítios arqueológicos/paleontológicos e fontes de água, evitando impactos provenientes da influência humana (Petráček *et al*., 2021).

No entanto, vale destacar que como qualquer outra tecnologia inovadora, é necessária experiência prévia dos operadores dos drones em ambientes subterrâneos (treinamentos e qualificações para lidar com operações em espaços confinados e para interpretar os dados coletados de maneira adequada), além de ser imprescindível o tempo em gabinete para a construção do modelo 3D com base na nuvem de pontos gerada em campo. Além disso, os drones precisam ser de pequenas dimensões e podem ser necessárias câmeras de alta resolução para imagens detalhadas, sensores de temperatura, umidade, gases ou até mesmo *Light Detection and Ranging* (*LiDAR)* para mapeamento 3D.

Dessa forma, um ponto de destaque com relação ao uso dos drones com escâner a laser acoplado em cavernas é a possibilidade do monitoramento com maior frequência, ou seja, estabelecer um plano para monitorar a integridade física da caverna ao longo do tempo com baixo impacto de visitações e menor risco às pessoas. Isso pode incluir voos regulares de drone para verificar alterações no ambiente e atualizar informações sobre eventuais situações de risco. Além disso, como será discutido mais adiante, será possível utilizar a IA para automatizar o processo e identificar possíveis anomalias.

O monitoramento da integridade física de cavernas utilizando drones específicos para espaços confinados com escâner a laser acoplado combina tecnologia avançada com boas práticas de segurança do trabalho, ajudando a garantir a segurança das pessoas, principalmente em cavernas com fragilidades estruturais e a mitigação de riscos ao patrimônio espeleológico. Além disso, são capazes de alcançar locais que seriam inacessíveis para os seres humanos (Zhang *et al*., 2017). A Figura 3 apresenta

Drones are important for driving state-of-the-art speleological exploration methods with the aim of providing viable resources for areas that are difficult to access. These devices can minimize risks to humans by reducing the need to climb walls, descend deep chasms and swim in flooded caves, as well as exposure to venomous animals, pathogens or even harmful gases. In addition, the use of drones can reduce impacts on subterranean environments resulting from traditional exploration methods, such as disturbance to sedimentary strata and organic resources located on the floor; depredation of speleothems, archaeological/paleontological sites and water sources; and other impacts resulting from human influence (Petráček *et al.*, 2021).

However, like any other innovative technology, drone operators must have prior experience in subterranean environments, such as training and qualifications to handle operations in confined spaces and to interpret the collected data appropriately. Operators must also spend time in the office to build the 3D model based on the point cloud generated in the field. In addition, drones must be small yet may require high-resolution cameras for detailed images; temperature, humidity and gas sensors; or even Light Detection and Ranging (LiDAR) for 3D mapping.

A highlight regarding the use of drones with attached laser scanners in caves is the possibility for more frequent monitoring, that is, establishing a plan to monitor the physical integrity of the cave over time with low impact from visitors and less risk to people. This may include regular drone flights to check for changes in the environment and update information on possible risk situations. Furthermore, as will be discussed later, it will be possible to use AI to automate the process and identify possible anomalies.

Monitoring the physical integrity of caves using drones specifically designed for confined spaces and equipped with laser scanners combines advanced technology with good occupational safety practices, which helps to ensure the safety of people, especially in caves with structural weaknesses, and mitigate risks to speleological heritage. In addition, they are capable of reaching places that would be inaccessible to humans (Zhang *et al.*, 2017). Figure 3 shows an example of the use of

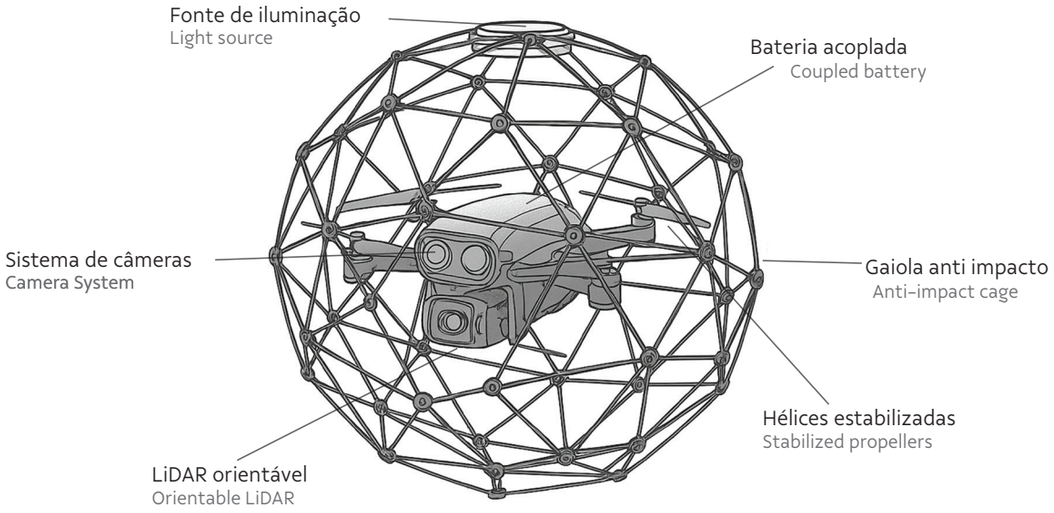




Figura 3: Componentes básicos de um drone de espaço confinado com escâner a laser acoplado (LiDAR) e equipamento em operação para aplicação no monitoramento da integridade física de cavernas ferríferas. Foto: Bruno F. de Aguiar.

Figure 3: Basic components of a confined space drone with attached laser scanner (LiDAR) and equipment in operation for application in monitoring the physical integrity of ferriferous caves. Photo: Bruno F. de Aguiar.

um exemplo de uso de drone com laser scanner acoplado sendo empregado em caverna inserida em litotipo ferruginoso.

Dispositivos robóticos

Assim como o drone de espaço confinado, também é possível a utilização de robôs com escâner a laser acoplado para acessar cavernas e gerar o mapeamento 3D para o monitoramento da integridade física. Segundo Lima (2019), sistemas robóticos são largamente utilizados na indústria com o intuito de tornar os sistemas de produção mais robustos e flexíveis. Além disso, robôs têm sido aplicados com sucesso em diversas outras áreas nos últimos anos.

Segundo Siciliano *et al.*, (2010), robôs podem ser classificados em: **manipuladores**, que têm a base fixa; e **móveis**, que têm a base móvel, permitindo locomoção em ambientes diversos. Manipuladores são usados geralmente em atividades industriais que demandam robustez. Por outro lado, os móveis são capazes de acessar ambientes complexos, em que o ser humano não é capaz de entrar, ou que oferecem elevados riscos.

Visando minimizar os riscos e aumentar a eficiência das atividades de inspeção e monitoramento de cavernas, a equipe de Espeleologia e Tecnologia da Diretoria de Licenciamento Ambiental da Vale deu início, em 2014, ao projeto EspeleoRobô, adquirindo uma plataforma robótica móvel teleoperada de seis pernas, inspirada no modelo de plataforma aberta RHex da *Boston Dynamics* (Figura 4) (Cota *et al.*, 2017).

Uma importante evolução do EspeleoRobô foi o desenvolvimento de uma torre de instrumentação, que além do monitoramento visual por câmeras, passou a disponibilizar o sensor *LiDAR* (Figura 5 a Figura 7) (Barros, 2021). Essa evolução ampliou o uso do EspeleoRobô para além da espeleologia, demonstrando ser uma tecnologia robusta e apta para diferentes ambientes e tipos de monitoramentos, como a inspeção de espaços confinados (obstruções em tubulações e galerias subterrâneas, além da reconstrução fotogramétrica 3D de minas subterrâneas) (Figura 8 a Figura 10).

O EspeleoRobô pode explorar e mapear áreas de difícil acesso em cavernas, coletando dados vitais para estudos multidisciplinares em ambientes cársticos, bem como realizar inspeções em tubulações, detectando problemas que possam causar grandes impactos em obras de engenharia (Azpurua *et al.*, 2019). Além disso, o EspeleoRobô garante uma inspeção detalhada e consistente, com a capacidade de realizar tarefas repetitivas. Um outro ponto relevante é que o robô elimina a necessidade de exposição humana a riscos, melhorando a segurança em operações de inspeção e manutenção.

a drone with an attached laser scanner in a cave inserted in a ferruginous lithotype.

Robotic devices

Just as with confined space drones, it is also possible to use robots with attached laser scanners to access caves and perform 3D mapping for monitoring physical integrity. According to Lima (2019), robotic systems are widely used in industry to make production systems more robust and flexible. Robots have also been successfully applied in several other areas in recent years.

According to Siciliano et al. (2010), robots can be classified as **manipulators**, which have a fixed base, or **mobile**, with a mobile base allowing movement in different environments. Manipulators are generally used in industrial activities that require robustness while mobile robots can access complex environments, which humans are not able to enter or which present high risks.

Aiming to minimize risks and increase the efficiency of cave inspection and monitoring activities, the Speleology and Technology team of Vale's Environmental Licensing Department started the EspeleoRobô project in 2014, by acquiring a six-legged teleoperated mobile robotic platform inspired by the *Boston Dynamics* RHex open platform model (Figure 4) (Cota *et al.*, 2017).

An important evolution of EspeleoRobô was the development of an instrumentation tower, which, in addition cameras for visual monitoring, now provides the *LiDAR* sensor (Figure 5 to Figure 7) (Barros, 2021). This evolution expanded the use of EspeleoRobô beyond speleology, proving to be a robust technology suitable for different environments and types of monitoring, such as the inspection of confined spaces (obstructions in pipes and subterranean galleries, in addition to 3D photogrammetric reconstruction of underground mines) (Figure 8 to Figure 10).

EspeleoRobô can explore and map hard-to-reach areas in caves, collecting vital data for multidisciplinary studies in karst environments, and perform inspections on pipelines to detect problems that could cause major impacts on engineering works (Azpurua *et al.*, 2019). In addition, EspeleoRobô ensures a detailed and consistent inspection, with the ability to perform repetitive tasks. Another relevant point is that the robot eliminates the need for human exposure to risks, thereby improving safety in inspection and maintenance operations.

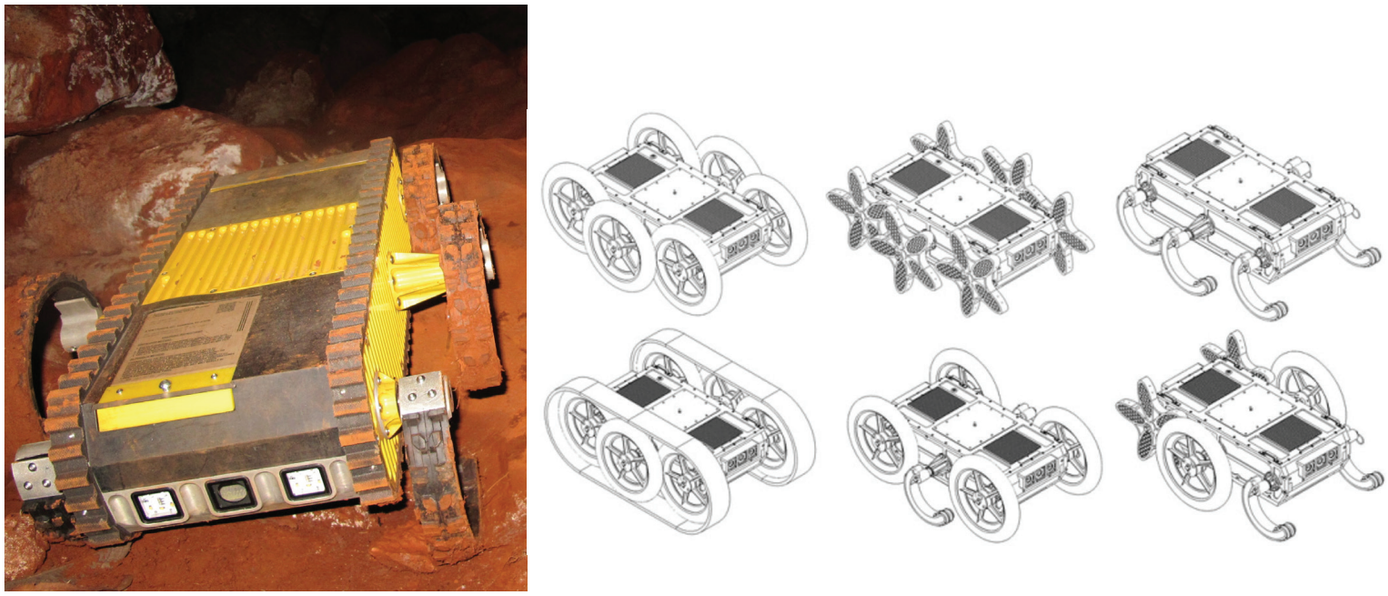


Figura 4: Dispositivo robótico denominado EspeleoRobô e possíveis modos de locomoção. Fonte: Azpúrua *et al*. (2021). Foto: Acervo Vale.

Figure 4: Robotic device called EspeleoRobô and possible modes of locomotion. Source: Azpúrua *et al.* (2021). Photo: Vale Collection.

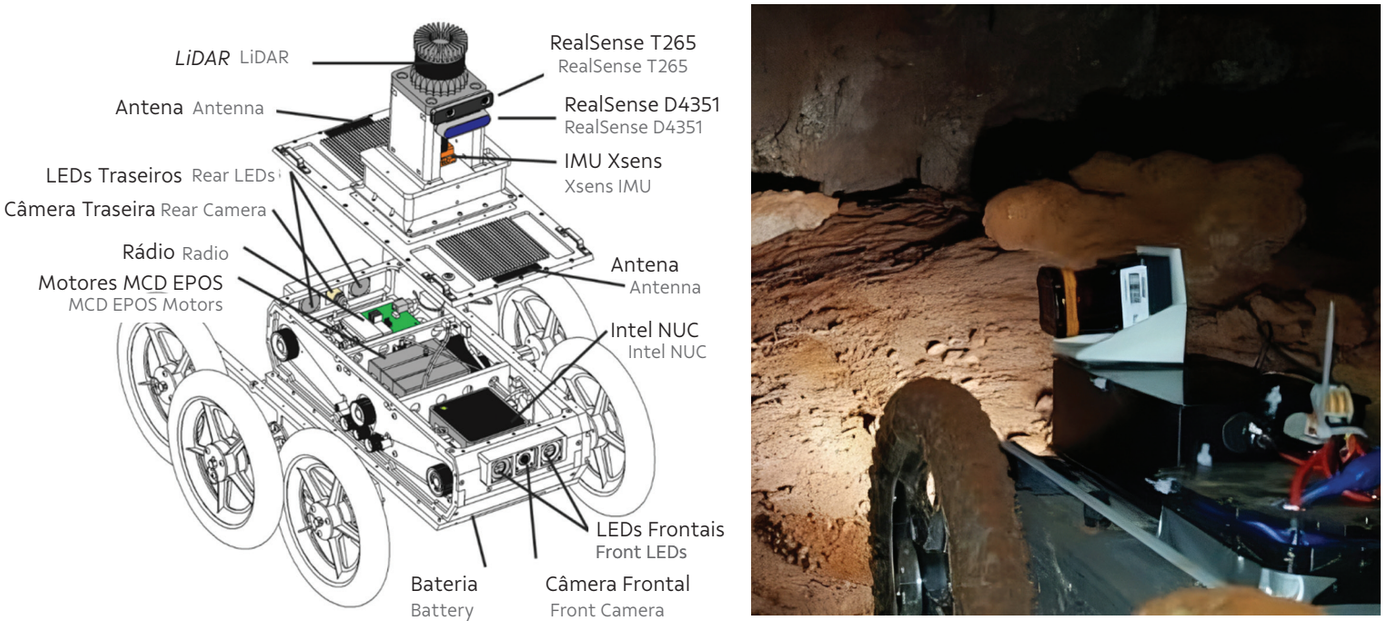


Figura 5: Visão geral da construção, componentes embarcados e torre de instrumentação do EspeleoRobô. Fonte: Barros (2021). À direita, o dispositivo com *LiDAR* acoplado para mapeamento 3D de cavernas. Foto: Acervo Vale.

Figure 5: Overview of the construction, embedded components and instrumentation tower of EspeleoRobô. Source: Barros (2021). On the right, the device with attached *LiDAR* for 3D mapping of caves. Photo: Vale Collection.

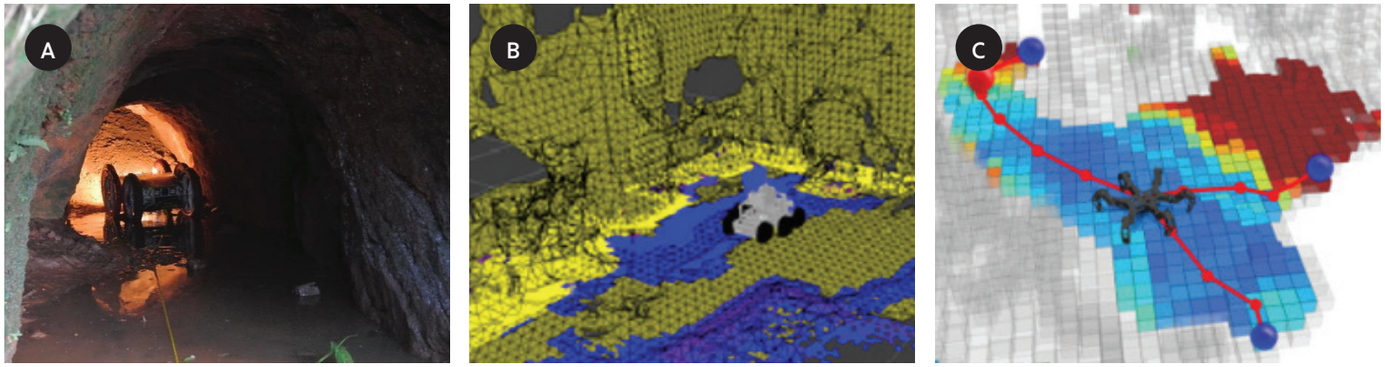


Figura 6: A) Incursão do robô em cavidade artificial com passagem estreita; B) resultado de mapeamento por malhas; C) Resultado de mapeamento por grade de elevação. Fotos: Acervo Vale.

Figure 6: A) Robot incursion into an artificial cavity with a narrow passage; B) result of mapping by meshes; C) Result of mapping by elevation grid. Photos: Vale Collection.



Figura 7: Comparação entre uma fotografia real (esquerda) e uma nuvem de pontos gerada pelo dispositivo robótico com *LiDAR* acoplado (direita). Fotos: Acervo Vale.

Figure 7: Comparison between a real photograph (left) and a point cloud generated by EspeleoRobô with attached *LiDAR* (right). Photos: Vale Collection.

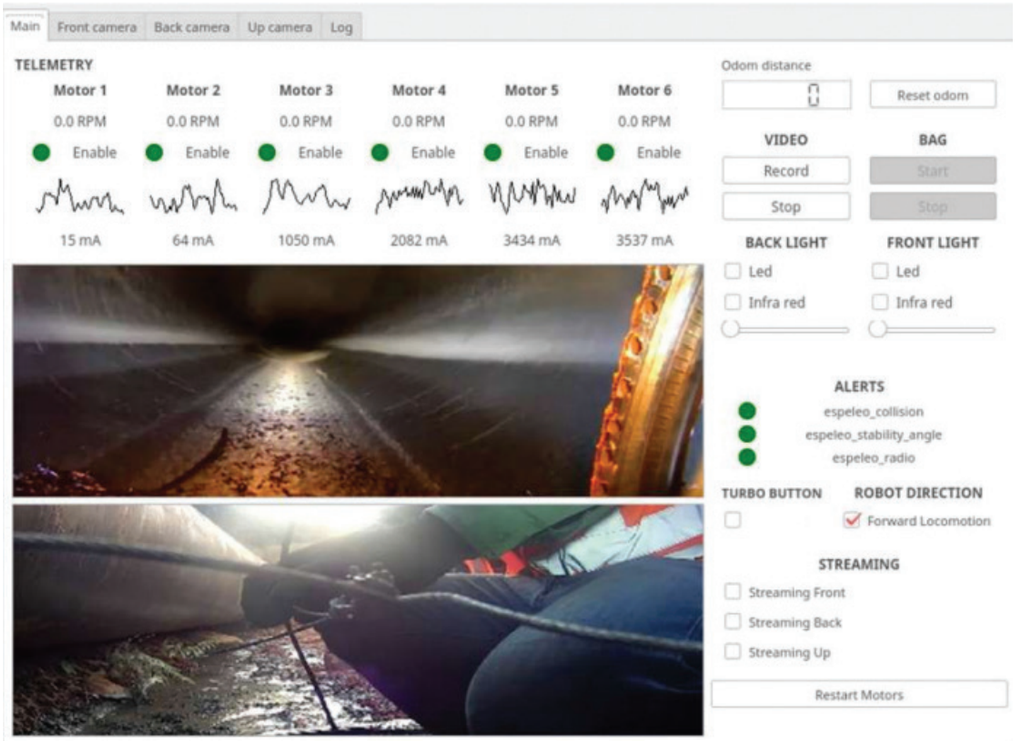


Figura 8: Interface gráfica de inspeção realizada pelo EspeleoRobô em espaço confinado (tubulação). Fotos: Acervo Vale.

Figure 8: Graphical interface of inspection performed by EspeleoRobô in confined space (pipeline). Photos: Vale Collection.

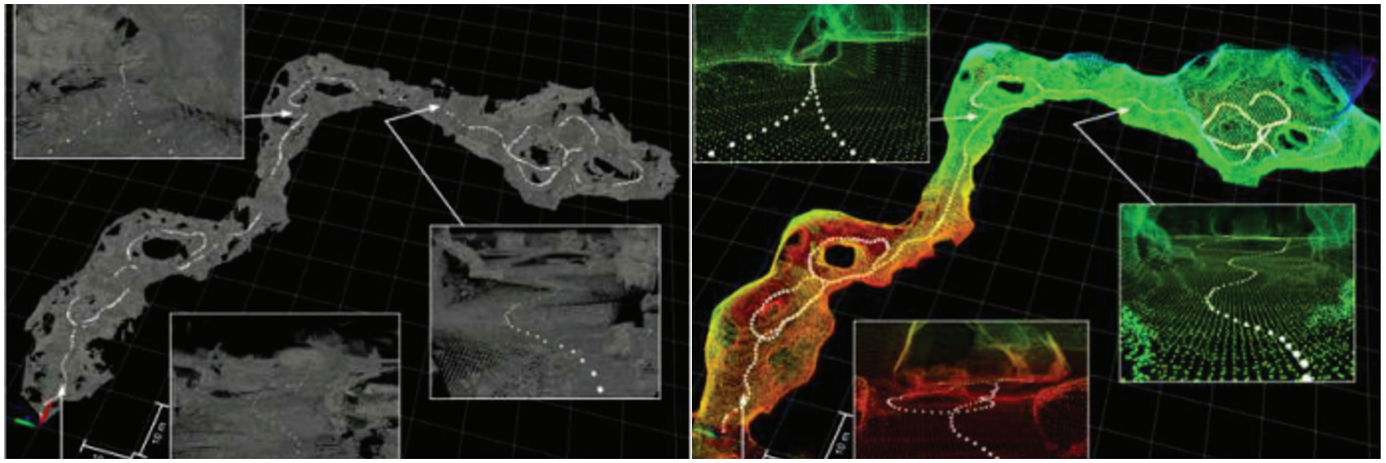


Figura 9: Reconstrução 3D de cavidade artificial após o uso do dispositivo robótico EspeleoRobô. Fonte: ITV/Vale.

Figure 9: 3D reconstruction of an artificial cavity after using EspeleoRobô. Source: ITV/Vale.

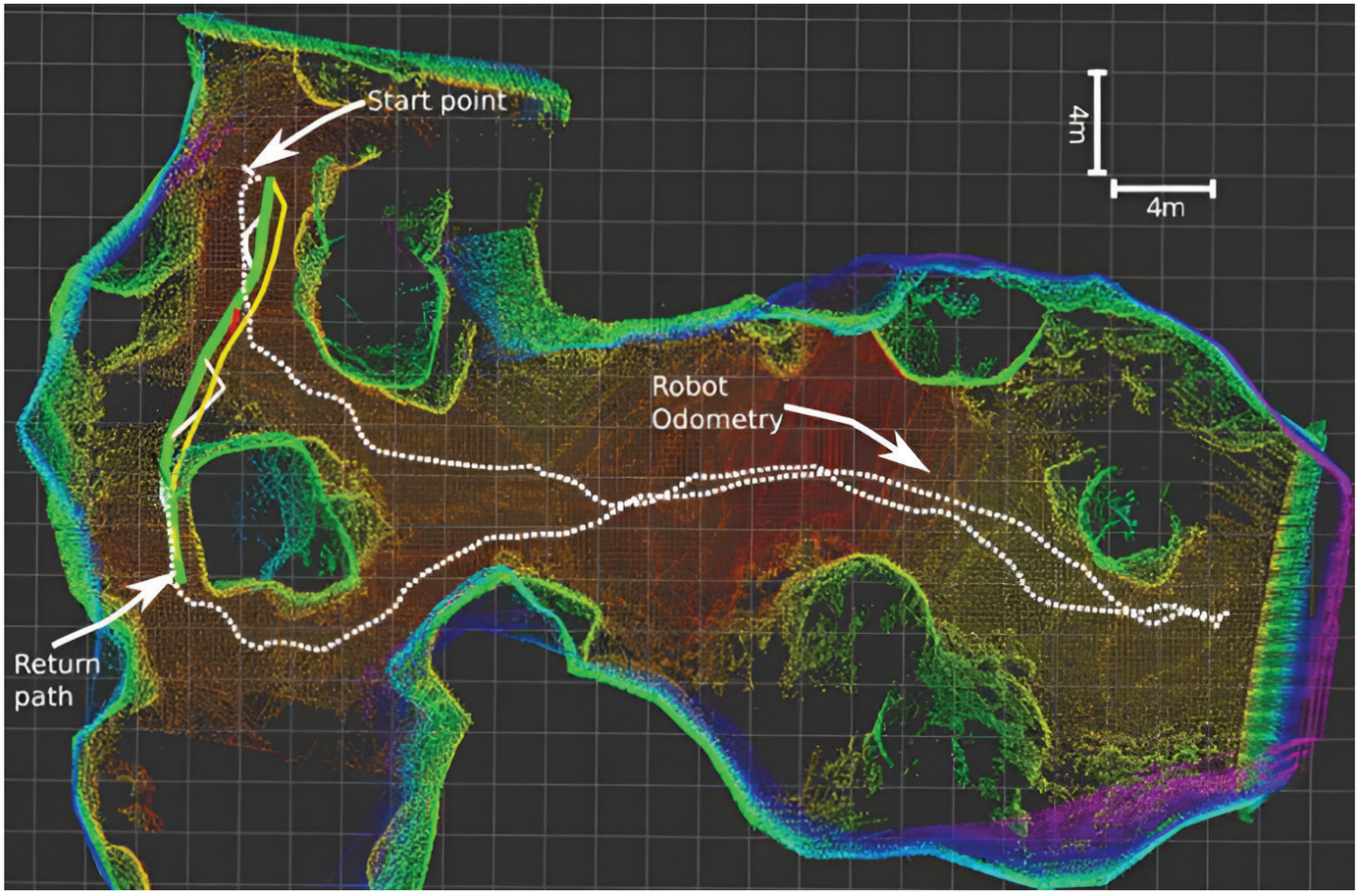


Figura 10: Nuvem de pontos *LiDAR* e resultado obtido com o mapeamento pelo dispositivo robótico EspeleoRobô. Fonte: ITV/Vale.
Figure 10: LiDAR point cloud and result obtained with mapping by EspeleoRobô. Source: ITV/Vale.

2.2 Aplicações potenciais

Os equipamentos utilizados no monitoramento de cavernas, minas subterrâneas ou espaços confinados como tubulações desempenham um papel crucial na segurança, eficiência e conservação desses ambientes. A seguir, são detalhadas algumas das aplicações dos três equipamentos mencionados: escâner a laser, drone de espaço confinado e dispositivos robóticos.

Apesar do uso de drones e robôs em cavernas ferríferas com o objetivo de monitorar a integridade física desses ambientes ainda ser recente, já é possível afirmar que futuramente será possível reduzir a necessidade de acesso de profissionais ao interior desses ambientes para esse objetivo. O EspeleoRobô, por exemplo, já realizou diversas inspeções e serviços de mapeamento em campo e, mesmo originalmente tendo sido

2.2 Potential applications

The equipment used to monitor caves, underground mines or confined spaces how pipeline plays a crucial role in the safety, efficiency and conservation of these environments. Below are some of the applications of the three pieces of equipment discussed above: laser scanner, confined space drone and robotic device.

Although the use of drones and robots in ferriferous caves to monitor the physical integrity of these environments is still recent, it is already clear that it will be possible to reduce the need for professionals to access this enviroments for this purpose in the future. EspeleoRobô, for example, has already carried out several inspections and mapping services in the field and, even

construído para o mapeamento de cavernas, demonstrou ser apto a uso em diferentes situações, o que demonstra o potencial para uso em condições mais severas.

Segundo Azpurua *et al*. (2021), mesmo em condições de baixa luminosidade é possível obter um mapeamento detalhado de espaços confinados utilizando sistemas de iluminação acoplados ao EspeleoRobô. O que mostra, dessa forma, a versatilidade dessa ferramenta.

Vale destacar que após o mapeamento detalhado de uma determinada caverna, a cada campanha de monitoramento da estabilidade física desse ambiente, é possível transportar esse mapa para um ambiente de realidade virtual (RV) ou aumentada (RA). Assim, o especialista responsável pelo monitoramento da integridade física fará as avaliações necessárias, assim como faria se estivesse *in loco* na caverna. Minimizando, dessa forma, a exposição ao risco da equipe técnica.

De acordo com Vitek (1994), o uso de mapas e mapeamentos está passando por um renascimento e sua aplicação terá um futuro brilhante com mapas digitais gerados a partir de sistemas de informação geográfica (GIS) e da RV. Com a consolidação da RV para uso multidisciplinar, seja para lazer ou para uso profissional, outro conceito ganha notoriedade, denominado Metaverso, principalmente pelo crescimento da indústria de jogos, a qual chamamos de "gamificação".

Em uma integração relativamente recente com os conceitos de RV, RA e Internet das Coisas (IoT), o metaverso tem sido estudado principalmente devido à aceleração global da indústria de jogos e propõe fornecer um mundo virtual 3D coletivo, com benefícios potenciais para transportar o mundo físico. O potencial uso dessas ferramentas em programas de monitoramento de cavernas é indiscutível. Portanto, o uso de ferramentas de imersão virtual segue um caminho de oportunidades em face de inúmeras possibilidades, seja nos campos da RV, RA ou metaverso (Figura 11 e Figura 12).

Além de usar ferramentas de imersão, outra possibilidade ainda mais interessante é utilizar ferramentas capazes de identificar alterações na caverna de forma automatizada. Por exemplo, o uso dos modelos 3D gerados por escâner a laser ou *LiDAR* combinado com a aplicação da técnica *change detection* pode se tornar uma ferramenta eficaz para o monitoramento da integridade física de cavernas, pois por meio dessa metodologia é possível detectar alterações mínimas na estrutura e na morfologia das cavernas ao longo da variável tempo.

though it was originally built for mapping caves, it has proven to be suitable for use in different situations, demonstrating its potential use in more severe conditions.

According to Azpurua *et al*. (2021), even in low light conditions it is possible to obtain detailed mapping of confined spaces using lighting systems coupled to EspeleoRobô, showing the versatility of this tool.

It is worth noting that after detailed mapping of a given cave, for each campaign to monitor the physical stability of that environment, the map can be transported to a virtual reality (VR) or augmented reality (AR) environment. Thus, the specialist responsible for monitoring physical integrity will make the necessary assessments, just as they would if they were *in loco*. This minimizes the technical team's exposure to risk.

According to Vitek (1994), the use of maps and mapping is undergoing a renaissance, and its application will have a bright future with digital maps generated from geographic information systems (GIS) and VR. With the consolidation of VR for multidisciplinary use, whether for leisure or professional use, another concept called Metaverse is gaining notoriety, mainly due to the growth of the gaming industry, which we call "gamification".

In a relatively recent integration with VR, AR and internet of things (IoT) concepts, the metaverse has been studied mainly due to the global acceleration of the gaming industry and proposes to provide a collective 3D virtual world, with potential benefits for transporting the physical world. The potential use of these tools in cave monitoring programs is indisputable. Therefore, the use of virtual immersion tools follows a path of opportunities in the face of countless possibilities, whether in the fields of VR, AR or metaverse (Figure 11 and Figure 12).

In addition to using immersion tools, another even more interesting possibility is the use of tools that can identify changes in a cave in an automated way. For example, the use of 3D models generated by laser scanners or LiDAR combined with the application of the change detection technique can become an effective approach for monitoring the physical integrity of caves since it can detect minimal changes in cave structure and morphology over time.

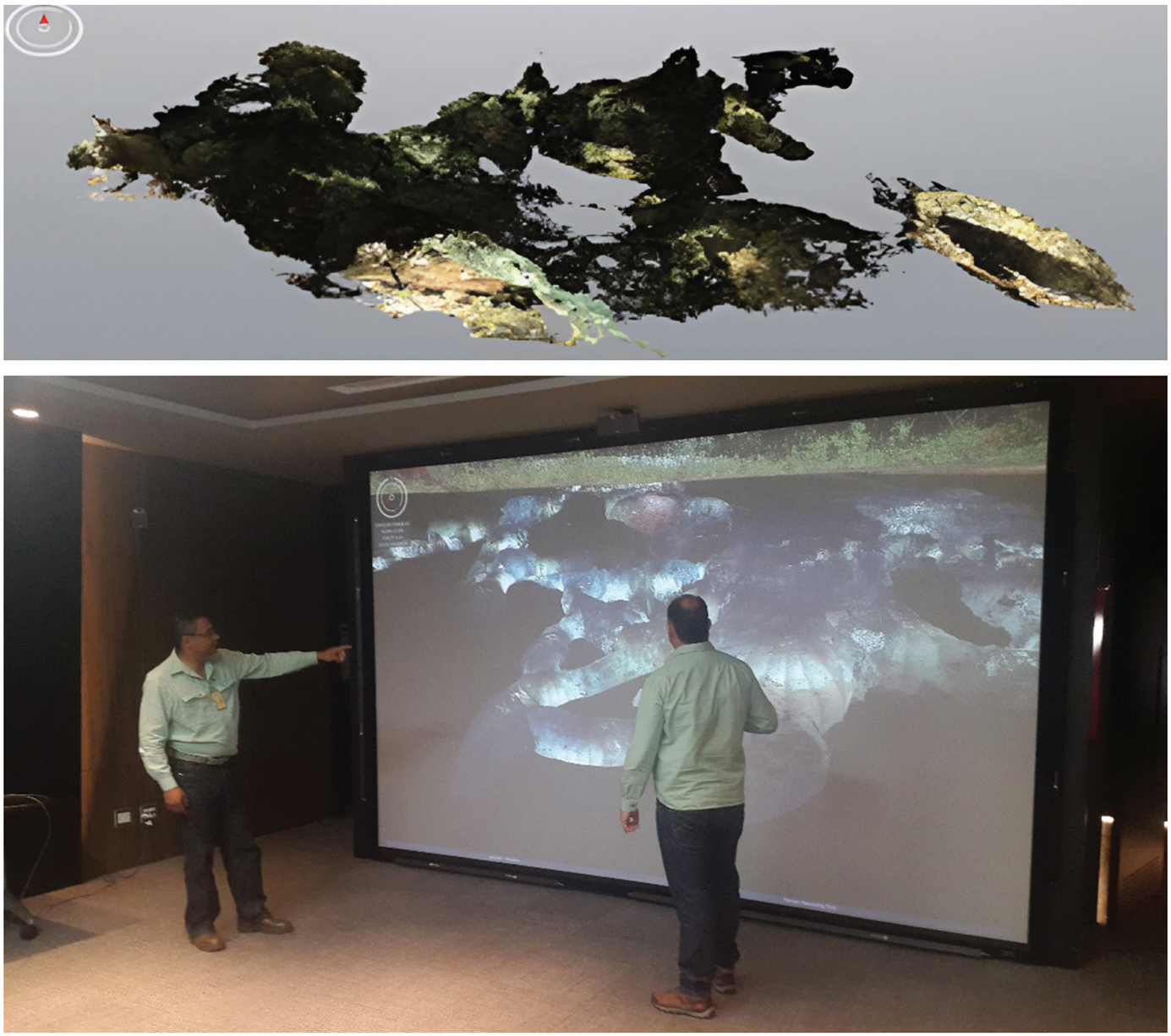


Figura 11: Aplicação da Realidade Virtual (RV) no monitoramento físico de cavernas. Utilizar o mapeamento 3D associado à RV permite analisar detalhadamente a caverna em ambiente seguro, sem as exposições aos riscos do ambiente natural.

Figure 11: Application of virtual reality (VR) to the physical monitoring of caves. Using 3D mapping associated with VR allows for the safe detailed analysis of a cave, without exposure to the risks of the natural environment.

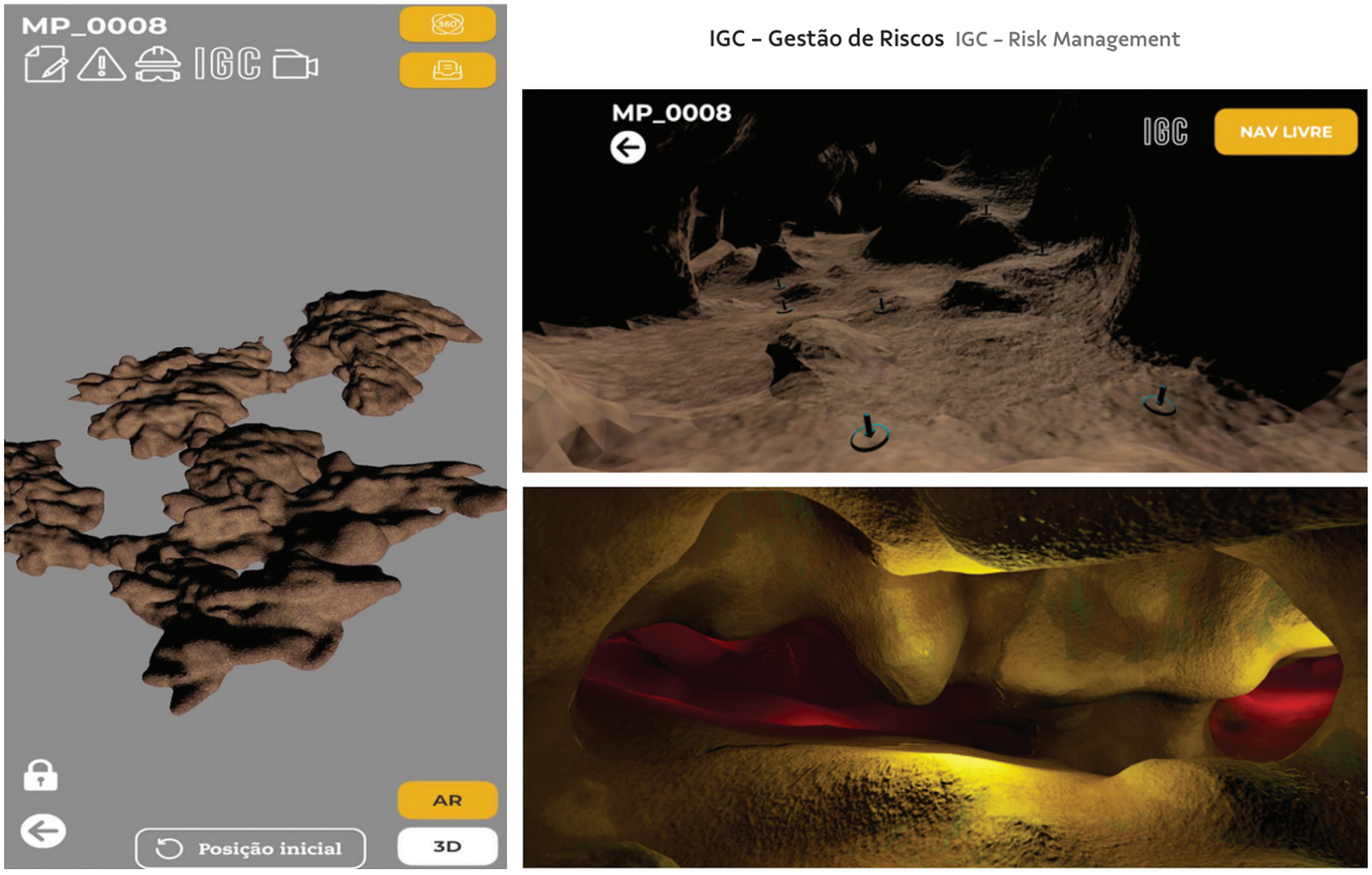


Figura 12: Modelo 3D de cavernas construído a partir de nuvem de pontos gerada por escâner a laser e visualização em aplicação de *smartphone* em realidade virtual. Nesta aplicação é possível navegar pela caverna, observando sua estrutura física e os riscos à segurança das pessoas que já estejam mapeados, por exemplo, os locais de maior fragilidade estrutural mapeados pelo Índice Geotécnico de Caverna (IGC) (ver capítulo 6 para detalhes).

Figure 12: 3D model of caves constructed from a point cloud generated by a laser scanner and displayed by a virtual reality *smartphone* application. Using this application, it is possible to navigate through the cave, observing its physical structure and the risks to people's safety that have already been mapped, such as the locations of greatest structural fragility mapped by the Cave Geotechnical Index (CGI), for example (see Chapter 6 for details).

Dessa forma, os algoritmos de *change detection* permitem a comparação entre diferentes conjuntos de dados para identificar mudanças. Os principais métodos incluem: comparação das nuvens de pontos das cavernas para analisar as diferenças ao longo do tempo e cálculo de variáveis espeleométricas, como volume, área e desnível das cavernas em momentos distintos. Logo, o uso de escâner a laser em combinação com algoritmos de *change detection* oferece uma abordagem avançada, objetiva e eficaz para o monitoramento da integridade física de cavernas.

In this way, *change detection* algorithms allow the comparison of different data sets to identify changes. The main methods include the comparison of cave point clouds to analyze differences over time and the calculation of speleometric variables of caves, such as volume, area and slope, at different times. Therefore, the use of laser scanners in combination with change detection algorithms offers an advanced, objective and effective approach for monitoring the physical integrity of caves.

O uso dessas metodologias combinadas não apenas contribui para o monitoramento da integridade física das cavernas, mas também para a segurança das pessoas e conservação do patrimônio espeleológico. Além disso, abre caminho para futuras pesquisas e inovações na área das geociências.

2.3 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para ampla implantação

A exploração de cavernas apresenta desafios únicos para o estudo e monitoramento de fragilidades estruturais. A complexidade dos ambientes cársticos aliada às limitações de acesso e segurança requer a utilização de tecnologias avançadas para o mapeamento preciso desses locais. Três métodos têm se destacado por sua capacidade de coleta de dados em ambientes adversos: escâner a laser, drones e robôs. No entanto, apesar do avanço tecnológico, a ampla implantação dessas técnicas ainda enfrenta obstáculos. Assim, este tópico discute as limitações, os desafios e as necessidades de desenvolvimento para que essas tecnologias sejam utilizadas de forma mais eficiente no mapeamento de cavernas.

Com relação ao escâner a laser, existem três limitações principais. São elas:

- Acesso físico: O transporte dos scanners até áreas de difícil acesso pode ser complexo devido ao tamanho e ao peso desses equipamentos.
- Alcance limitado: Em ambientes com passagens estreitas ou geometria complexa, a linha de visão do laser pode ser obstruída, limitando a cobertura do levantamento. Desse modo, faz-se necessária a marcação de mais bases topográficas, o que torna o trabalho mais oneroso e demorado.
- Dependência de operadores especializados: A operação e a interpretação dos dados exigem profissionais treinados, o que eleva os custos e dificulta a sua utilização por pequenos projetos ou em cavernas inseridas em áreas remotas.

Dessa forma, as necessidades para o desenvolvimento da técnica de mapeamento utilizando o escâner a laser são as seguintes:

- Redução das dimensões dos equipamentos: A criação de scanners mais compactos e leves facilitaria o transporte e a operação em espaços confinados.

The use of these combined methodologies not only contributes to monitoring the physical integrity of caves, but also to the safety of people and to the conservation of speleological heritage. It also paves the way for future research and innovations in the field of geosciences.

2.3 Limitations, challenges and development needs for widespread implementation

Cave exploration presents unique challenges for the study and monitoring of structural weaknesses. The complexity of karst environments combined with access and safety limitations requires the use of advanced technologies for accurate mapping of these sites. The three methods mentioned above — laser scanners, drones, and robots — have stood out for their ability to collect data in adverse environments. However, despite technological advances, the widespread implementation of these techniques still faces obstacles. Thus, this topic discusses the limitations, challenges, and development needs for the more efficient use of these technologies in cave mapping.

The laser scanner has the following three main limitations:

- Physical access: Transporting scanners to hard-to-reach areas can be complex due to the size and weight of this equipment.
- Limited range: The laser's line of sight may be obstructed in environments with narrow passages or complex geometry, limiting survey coverage. This makes it is necessary to mark more topographic bases, which makes the work more expensive and time-consuming.
- Dependence on specialized operators: Operation and data interpretation require trained professionals, which increases costs and makes it difficult to use for small projects or in caves located in remote areas.

Thus, the requirements for developing a mapping technique using the laser scanner are as follows:

- Reduction in equipment dimensions: The creation of more compact and lightweight scanners would facilitate transportation and operation in confined spaces

- Algoritmos de processamento avançado: Desenvolvimento de *softwares* capazes de lidar com ambientes de geometria complexa e fornecer uma interpretação automática dos dados geoespaciais.
- Integração com outras tecnologias: Combinar o escâner a laser com drones ou robôs pode aumentar a eficiência em ambientes onde o acesso humano é limitado.

No que se refere às limitações dos drones em espaços confinados, temos:

- GPS limitado ou inexistente: A ausência de sinais de GPS em cavernas impede a navegação autônoma precisa, exigindo tecnologias alternativas para controle de voo.
- Duração limitada da bateria: O tempo de voo dos drones é limitado, restringindo sua utilização em longas expedições em decorrência da troca constante de baterias.
- Condições ambientais adversas: Cavernas apresentam obstáculos como a umidade elevada, temperaturas extremas, drenagens subterrâneas, passagens estreitas e escuridão total, que podem prejudicar a performance dos equipamentos.

Logo, as necessidades para o desenvolvimento da técnica de drones em espaços confinados são as seguintes:

- Tecnologias de navegação interna: Sensores que possibilitem a navegação autônoma em ambientes sem GPS, como SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), são essenciais para o uso eficaz de drones em cavernas.
- Aumento da autonomia: O desenvolvimento de baterias mais duradouras e drones com capacidade de recarga em campo são aspectos importantes para ampliar o tempo de voo.
- Sistemas de estabilização: Melhorias nos sistemas de estabilização para operar em ambientes turbulentos, com presença de água ou com alta umidade, seriam necessárias para obter dados mais precisos.

Além disso, com relação às limitações de aplicação dos robôs, podemos citar:

- Mobilidade restrita: O deslocamento de robôs em terrenos acidentados, como em cavernas, é uma limitação significativa. A geometria irregular das cavernas pode

- Advanced processing algorithms: Development of software capable of handling environments with complex geometry and providing automatic interpretation of geospatial data.
- Integration with other technologies: Combining the laser scanner with drones or robots can increase efficiency in environments where human access is limited.

Drones have the following limitations in confined spaces:

- Limited or no GPS: The absence of GPS signals in caves prevents accurate autonomous navigation, requiring alternative technologies for flight control.
- Limited battery life: The flight time of drones is limited, restricting their use on long expeditions due to the constant replacement of batteries.
- Adverse environmental conditions: Caves present obstacles such as high humidity, extreme temperatures, subterranean drainage, narrow passages and total darkness, which can impair equipment performance.

Therefore, the needs for the development of drone technology in confined spaces are as follows:

- Internal navigation technologies: Sensors that enable autonomous navigation in environments without GPS, such as SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), are essential for the effective use of drones in caves.
- Increased autonomy: The development of longer-lasting batteries and drones with the ability to recharge in the field are important aspects for extending flight time.
- Stabilization systems: Improvements in stabilization systems to operate in turbulent, with presence of water or high-humidity environments would be necessary to obtain more accurate data.

Robot application has the following limitations:

- Restricted mobility: The movement of robots in rough terrain, such as caves, is a significant limitation. The irregular geometry of caves can represent insurmountable

representar barreira intransponível para muitos modelos de robôs, como cavernas com grande concentração de blocos de rocha.
- Resistência aos ambientes extremos: Muitos robôs ainda não possuem a robustez necessária para operar em condições adversas encontradas em cavernas, como umidade elevada, poeira ou lama.
- Alto custo: O desenvolvimento e a manutenção de robôs especializados para cavernas ainda são economicamente inviáveis para muitos projetos de pesquisa ou exploração de pequena escala.

Assim, as necessidades de desenvolvimento da técnica de inspeção de cavernas utilizando robôs são as citadas a seguir:

- Sistemas de locomoção avançados: Robôs com pernas articuladas ou sistemas híbridos de locomoção seriam mais eficazes em ambientes irregulares.
- Autonomia e resiliência: Robôs capazes de operar de forma autônoma por longos períodos em ambientes extremos e com capacidade de reparo ou manutenção automatizada.
- Redução de custos: Iniciativas de desenvolvimento de robôs mais acessíveis e modulares para a utilização em projetos com poucos recursos financeiros.

A implementação generalizada de escâner a laser, drones e robôs no mapeamento e monitoramento de cavernas apresenta um vasto potencial, mas é necessária uma superação das limitações atuais para que essas tecnologias sejam aplicadas de forma ampla, eficiente e acessível. A interdisciplinaridade entre engenharia, geologia, robótica e inteligência artificial será fundamental para o avanço dessas ferramentas, garantindo que as cavernas possam ser mapeadas com maior precisão, segurança e eficácia no futuro.

3 MONITORAMENTO MICROSSÍSMICO PARA PREVISIBILIDADE DA SITUAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO NO ENTORNO DAS CAVIDADES

3.1 Introdução ao método e aplicações atuais

As vibrações induzidas e os potenciais efeitos em cavernas continuam sendo temas de importante discussão e necessidade de evolução, uma vez que não existem referências bem definidas que atestem os níveis máximos de vibração que podem causar

barriers for many robot models, such as caves with large concentrations of rock blocks.
- Resistance to extreme environments: Many robots still do not have the necessary robustness to operate in the adverse conditions found in caves, such as high levels of humidity, dust or mud.
- High cost: The development and maintenance of specialized cave robots is still economically unfeasible for many small-scale research or exploration projects.

Thus, the development needs for cave inspection techniques using robots are as follows:

- Advanced locomotion systems: Robots with articulated legs or hybrid locomotion systems would be more effective in irregular environments.
- Autonomy and resilience: Development of robots capable of operating autonomously for long periods in extreme environments and with automated repair or maintenance capabilities.
- Cost reduction: Initiatives to develop more accessible and modular robots for use in projects with limited financial resources.

The widespread implementation of laser scanners, drones and robots in cave mapping and monitoring has vast potential, but current limitations need to be overcome for these technologies to be applied widely, efficiently and affordably. Interdisciplinary work between engineering, geology, robotics and artificial intelligence will be essential for the advancement of these tools to ensure that caves can be mapped with greater accuracy, safety and efficiency in the future.

3 MICROSEISMIC MONITORING FOR PREDICTING THE CONDITION OF THE ROCK MASS AROUND CAVES

3.1 Introduction to the method and current applications

Induced vibrations and their potential effects on caves continue to be topics of important discussion and need for evolution, since there are no well-defined references that attest to the maximum vibration levels that can cause physical

alterações físicas nas cavernas, principalmente devido às suas características extremamente heterogêneas.

No Brasil, os documentos disponíveis na literatura para limites de vibração se orientam a partir do princípio da precaução, fundamentados em normas técnicas elaboradas para outros tipos de estruturas, sobretudo civis. Contudo, alguns estudos têm demonstrado que os limites de vibração recomendados pela maioria das normas internacionais apresentam elevada margem de segurança, sendo desnecessariamente rigorosos, como concluiu Norén-Cosgriff *et al*. (2020), após observar que eventos variando de 22 mm/s a 250 mm/s não causaram nenhuma trinca nas estruturas civis monitoradas.

Em 2019, após autorização do órgão ambiental competente, foi realizado um estudo de monitoramento durante o avanço de lavra no entorno da caverna ferrífera N4E_0026 (para detalhes ver capítulo 6), localizada na região da Serra dos Carajás, estado do Pará. Esse estudo permitiu identificar mecanismos de alteração, como queda de blocos e fragmentos de rocha, abertura de descontinuidades e reativação de estruturas, que podem ocorrer tanto por processos naturais ou por vibrações induzidas (Barbosa *et al*., 2019). Neste estudo especificamente, a primeira alteração física foi observada após um evento de 120 mm/s.

Considerando o potencial da metodologia para o monitoramento e tendo em vista a importância de identificar eventos catalisadores dos mecanismos de alteração física em cavernas ferríferas, o monitoramento microssísmico teve seu primeiro teste no Brasil aplicado ao monitoramento de cavernas na Província Mineral de Carajás, no estado do Pará. Tal monitoramento estava vinculado a processos de licenciamento ambiental e os resultados ainda não foram publicados.

Diferentemente da característica de medição pontual dos sismógrafos de engenharia, a concepção do arranjo em malha da microssísmica e a posterior análise integrada dos dados de seus sensores, permitem a abrangência de uma área de monitoramento maior no entorno da caverna ou do conjunto de cavernas-alvo do estudo.

Os sistemas de microssísmica são similares aos sismógrafos de engenharia e utilizam componentes conhecidos como "estações sísmicas", que são dotadas de sensores para o registro do movimento ondulatório (geofones e acelerômetros), porém com uma sensibilidade significativamente maior e que conseguem registrar estímulos menos intensos que os sensores dos sismógrafos convencionais. A microssísmica é capaz de gerar resultados equivalentes em termos de resposta

changes in caves, mainly due to their extremely heterogeneous characteristics.

In Brazil, the documents available in the literature for vibration limits are guided by the precautionary principle, based on technical standards developed for other types of structures, especially civil structures. However, some studies have shown that the vibration limits recommended by most international standards have a high safety margin and are unnecessarily strict, as concluded by Norén-Cosgriff et al. (2020), after observing that events ranging from 22 mm/s to 250 mm/s did not cause any cracks in the monitored civil structures.

In 2019, after authorization from the competent environmental agency, a monitoring study was carried out during mining progress around the ferriferous cave N4E_0026 (for details, see Chapter 6), located in the Serra dos Carajás region, state of Pará. This study allowed the identification of alteration mechanisms, such as the fall of blocks and rock fragments, the opening of discontinuities and the reactivation of structures, which can occur either through natural processes or through induced vibrations (Barbosa *et al.*, 2019). In this study specifically, the first physical alteration was observed after a 120 mm/s event.

Considering the potential of the methodology for monitoring and the importance of identifying events that catalyze the mechanisms of physical alteration in ferriferous caves, microseismic monitoring was first tested in Brazil in caves in the Mineral de Carajás Province, state of Pará. This monitoring was linked to environmental licensing processes and the results have yet to be published.

Unlike point measurement, which is characteristic of engineering seismographs, the design of the microseismic mesh arrangement and the subsequent integrated analysis of the data from its sensors allow the coverage of a larger monitoring area around a cave or set of caves targeted for study.

Microseismic systems are similar to engineering seismographs and use components known as "seismic stations," which are equipped with sensors to record wave motion (geophones and accelerometers), but with significantly greater sensitivity and the ability to record less intense stimuli than sensors of conventional seismographs. Microseismic systems are capable of returning equivalent results, in terms of vibration level response,

do nível de vibração, por meio de dois tipos de abordagem: o monitoramento convencional e o monitoramento a partir da interferometria sísmica do ruído ambiente, também conhecida como microssísmica passiva.

No monitoramento convencional, os registros são avaliados a partir de quando ocorrem e da sua intensidade, com foco naqueles induzidos pela atividade humana, sendo análogo ao monitoramento realizado com sismógrafos de engenharia. Já o monitoramento passivo consiste na análise do ruído do ambiente, que é uma característica intrínseca do maciço, permitindo identificar possíveis alterações no meio, bem como a localização desses eventos. Esse monitoramento passivo pode ser considerado como a principal ferramenta para o controle de alterações físicas em cavernas, uma vez que permite mensurar alterações na velocidade sísmica do maciço, revelando, antecipadamente, potenciais reativações estruturais e, consequentemente, alterações físicas que possam ocorrer nas cavidades naturais subterrâneas.

Em resumo, entre as várias possibilidades, a partir do monitoramento microssísmico, podemos citar aplicações já bastante conhecidas das investigações sismológicas como: a localização dos eventos sísmicos; o mecanismo da fonte, que permite determinar a sua natureza; a caracterização do campo de tensões; a análise temporal com a evolução da atividade sísmica e a distribuição da frequência e magnitude, que auxilia na compreensão do risco sísmico.

Em relação ao monitoramento microssísmico em cavernas ferríferas, resultados iniciais ainda não publicados obtidos na Província Mineral de Carajás, no estado do Pará, permitiram identificar a resposta de uma detonação através da ferramenta *scan* aplicada à interferometria sísmica (Figura 13), onde é possível observar uma variação súbita e momentânea na velocidade de onda sísmica para um determinado sensor, imediatamente após uma detonação. Na Figura 13B, a partir de uma análise em planta, é possível verificar que essa detonação não provocou alterações no maciço na região da caverna monitorada, uma vez que as velocidades sísmicas retornaram aos patamares de *background* anterior após a ocorrência do evento.

Posteriormente, a partir de um sistema de microssísmica instalado em várias cavidades naturais subterrâneas distintas no entorno de ambientes de mineração (Figura 14), foram avaliadas as condições do estado de tensão do maciço, com a utilização dos parâmetros momento sísmico, frequência e magnitude de momento.

through two types of approaches: conventional monitoring and monitoring based on seismic interferometry of ambient noise, also known as passive microseismic monitoring.

In conventional monitoring, records are assessed based on when they occur and their intensity, focusing on those induced by human activity, similar to the monitoring carried out with engineering seismographs. Passive monitoring consists of analyzing ambient noise, which is an intrinsic characteristic of a massif, allowing the identification of possible changes in the environment, as well as the location of these events. This passive monitoring can be considered the main tool for controlling physical changes in caves since it allows the measurement of changes in the seismic velocity of a massif, revealing, in advance, potential structural reactivations and, consequently, physical changes that may occur in caves.

In summary, among the various possibilities based on microseismic monitoring are applications that are already well-known in seismological investigations, such as: determining the location of seismic events; identification of the mechanism of the source, which allows determining its nature; characterization of the stress field; temporal analysis with the evolution of seismic activity; and documenting the distribution of frequency and magnitude, which helps in understanding seismic risk.

Regarding microseismic monitoring in ferriferous caves, initial unpublished results obtained in Mineral de Carajás Province, state of Pará, identified the response of a detonation through the scan tool applied to seismic interferometry (Figure 13), whereby it is possible to observe a sudden and momentary variation in the seismic wave speed for a given sensor immediately after a detonation. Figure 13B, from a plan analysis, shows that this detonation did not cause changes in the massif in the region of the monitored cave, since the seismic velocities returned to previous background levels after the occurrence of the event.

Subsequently, using a microseismic system installed in several distinct caves around mining environments (Figure 14), the conditions of the stress state of the massif were evaluated using the parameters of seismic moment, frequency and moment magnitude.

Através da trinca dos parâmetros (momento sísmico, frequência e magnitude de momento), estimam-se isolinhas que representam patamares na condição de tensão verificada em Megapascal (MPa) (Figura 15), que pode ser comparada aos valores de resistência à compressão uniaxial do maciço local, com o objetivo de indicar processo de desestruturação desse, caso sejam observadas solicitações acima da sua capacidade de resistência. No caso das cavernas ferríferas de Carajás, o maciço que suporta as cavernas é representado pelas variedades de crosta laterítica, cujos valores de resistência à compressão uniaxial são superiores a 10Mpa, segundo Gonçalves (2019).

Os resultados dessa análise demonstram, independentemente das condições a que foi submetido o maciço que hospeda as cavernas, que o estado de tensão associado não apresenta

Through the analysis of parameters (seismic moment, frequency and moment magnitude), isolines are estimated that represent levels in the stress condition in megapascals (MPa) (Figure 15), which can be compared to the uniaxial compressive strength values of the local massif. The aim is to indicate a process of its destructuring if stresses above its resistance capacity are observed. In the case of the ferriferous caves of Carajás, the massif that supports the caves is represented by varieties of lateritic crust with uniaxial compressive strength values greater than 10 MPa, according to Gonçalves (2019).

The results of this analysis demonstrate that, regardless of the conditions to which the rock mass hosting the caves was subjected, the associated stress state does not present

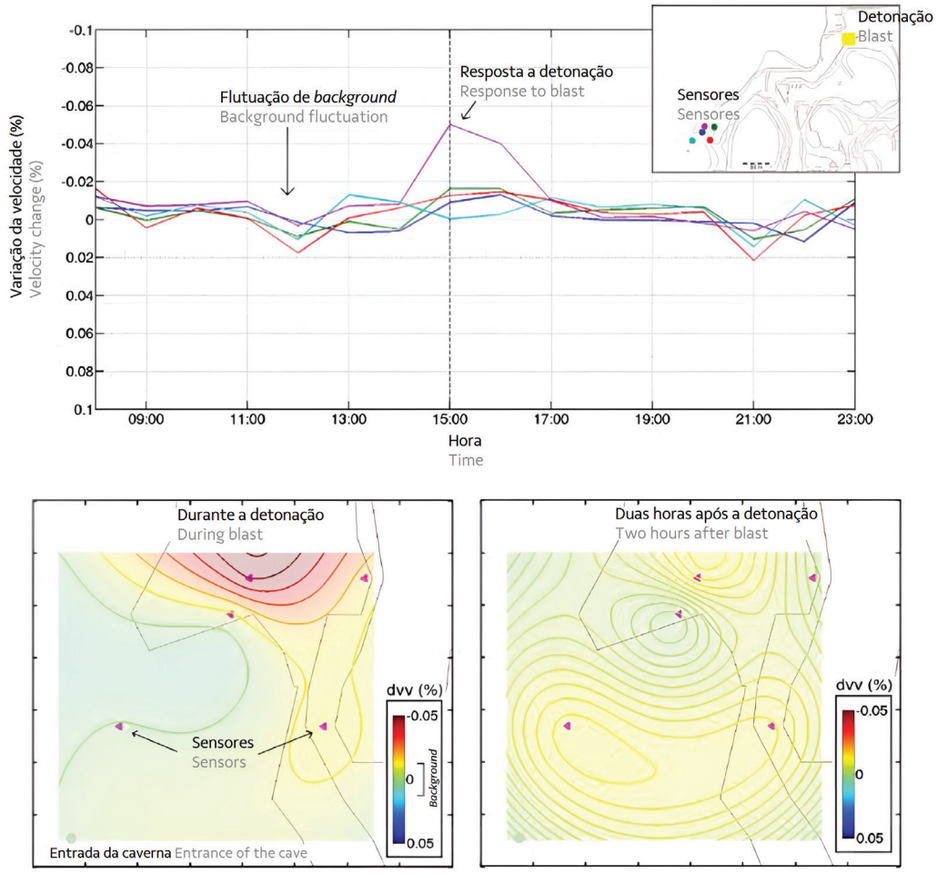


Figura 13: Exemplo de análises com o monitoramento microssísmico de vibrações. Fonte: DIAS *et al.*, 2016.
Figure 13: Exemple of analysis with microseismic vibration monitoring. Source: DIAS *et al.*, 2016.

valores que ultrapassem o seu limite de resistência, uma vez que o predomínio de valores é inferior a 1.0 Mpa, sendo este muito inferior aos parâmetros de resistência esperados. Assim, permitindo, com base nos dados disponíveis e avaliados, descartar quaisquer evidências de comprometimento da integridade dos parâmetros de resistência originais do maciço nas regiões das cavernas monitoradas a partir das atividades de lavra executadas, uma vez que as alterações observadas se deram de maneira elástica, sem comprometimento dos parâmetros de resistência naturais do maciço.

values that exceed its resistance limit, since the predominance of values are below 1.0 MPa, which is much lower than the expected resistance parameters. Thus, based on the available and evaluated data, it is possible to rule out any evidence of a compromise to the integrity of the original resistance parameters of the mass in the regions of the monitored caves from the mining activities carried out, since the observed changes occurred in an elastic manner, without compromising the natural resistance parameters of the mass.

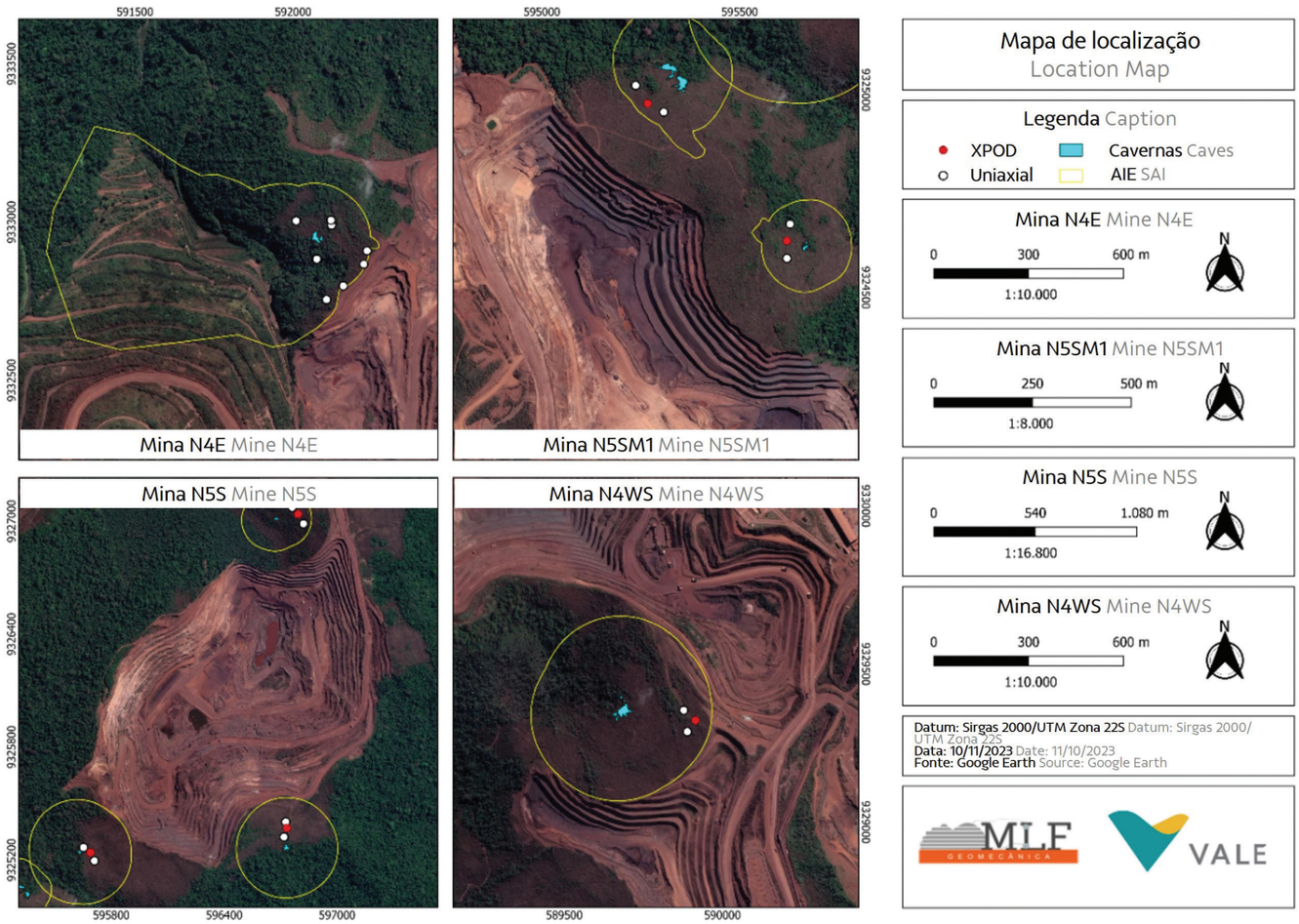


Figura 14: Mapa de localização com a disposição dos sensores nas minas de N5S, N5SM1, N4E e N4WS e as cavidades-alvo do estudo. AIE: Área de Influência Espeleológica; XPOD e Uniaxial: modelos de sensores sísmicos.

Figure 14: Location map with the arrangement of sensors in mines N5S, N5SM1, N4E and N4WS and the target caves of the study. SAI: Speleological Area of Influence; XPOD and Uniaxial: seismic sensor models.

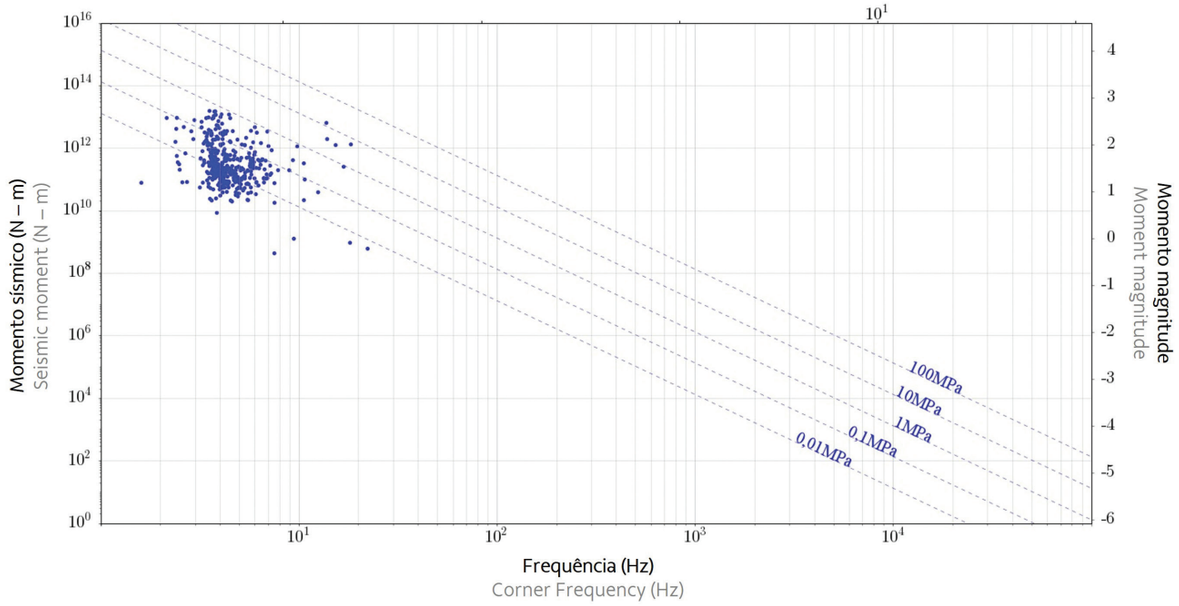


Figura 15: Acompanhamento periódico dos parâmetros: momento sísmico (*seismic moment*), frequência (*corner frequency*) e momento magnitude (*moment magnitude*), para inferir as condições de tensão do maciço no entorno das cavidades.

Figure 15: Periodic monitoring of the parameters of seismic moment, corner frequency and moment magnitude, to infer the stress conditions of the massif around the caves.

3.2 Aplicações potenciais

Segundo Ma *et al*. (2020), o monitoramento microssísmico em maciços rochosos pode ser utilizado para acompanhamento e monitoramento, desde o início do processo de deformação das rochas até o fraturamento e instabilidade do maciço. Ainda, conforme apontam Mendecki *et al*. (2010), esse tipo de monitoramento auxilia na localização de zonas de maior risco, avaliação da resposta do maciço à atividade da mina, estimativa do perigo sísmico, emissão de alertas e análise retroativa dos dados. Como as cavernas estão inseridas no maciço rochoso, a metodologia de monitoramento microssísmico pode ser uma grande ferramenta de análise de previsibilidade da estabilidade física no entorno de minerações em operação corrente.

É importante salientar que o monitoramento microssísmico se encontra em fase de avaliação de resultados para cavernas ferríferas, podendo ser aplicado em outras litologias e representar um avanço significativo na sismologia aplicada, oferecendo *insights* valiosos para a segurança e operação em áreas de mineração, tendo em vista a capacidade de rastrear e analisar eventos sísmicos naturais e detonações em tempo

3.2 Potential applications

According to Ma *et al.* (2020), microseismic monitoring of rock masses can be used for monitoring and tracking, from the beginning of the rock deformation process to the fracturing and instability of the mass. Furthermore, as pointed out by Mendecki *et al.* (2010), this type of monitoring helps to locate areas of greater risk, assess the masses response to mining activity, estimate seismic hazard, issue alerts and perform retroactive data analysis. Since caves are located in the rock mass, the microseismic monitoring methodology can be a great tool for analyzing the predictability of physical stability in the surroundings of mining operations in current operation.

It is important to note that microseismic monitoring is currently being evaluated for results in ferriferous caves and can be applied to other lithologies. It represents a potential significant advance in applied seismology as it offers valuable insights for safety and operations in mining areas, given the ability to track and analyze natural seismic events and detonations in real

real, permitindo uma melhor compreensão e gestão dos riscos. A integração de tecnologias de monitoramento e a otimização da disposição dos sensores são fundamentais para maximizar o potencial dessa ferramenta.

3.3 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para o uso

As principais limitações identificadas no monitoramento microssísmico de maciços rochosos no entorno de cavernas são as seguintes:

- Complexidade na interpretação dos dados: Um dos principais desafios do monitoramento microssísmico é a correta interpretação dos sinais captados. Muitos microssismos podem ser confundidos com ruídos não relacionados à integridade estrutural (ruídos de fundo), como o impacto de atividades humanas, movimento de equipamentos ou até mesmo fatores ambientais, como mudanças na pressão atmosférica. A separação entre eventos sísmicos relevantes e "ruídos de fundo" requer análises sofisticadas e, frequentemente, profissionais altamente capacitados.
- Alcance e sensibilidade dos sensores: Os sensores de microssismos possuem um raio de detecção limitado, o que implica na necessidade de instalação de uma grande quantidade de equipamentos para cobrir extensas áreas do maciço rochoso. Em cavernas de grande extensão ou com geometria complexa, pode ser difícil garantir que todos os eventos relevantes sejam detectados.
- Limitação de profundidade: Em alguns casos, eventos sísmicos originados em camadas profundas podem não ser captados com precisão pelos sensores na superfície ou próximo à caverna, comprometendo a detecção de instabilidades incipientes.
- Custos e Infraestrutura: O monitoramento microssísmico exige uma infraestrutura considerável, incluindo a instalação de redes de sensores, sistemas de comunicação para a transmissão dos dados em tempo real e *software* de processamento especializado. Os custos associados à aquisição, instalação e manutenção dos equipamentos, além da contratação de especialistas para interpretação dos dados, podem inviabilizar projetos menores ou de curta duração.
- Ruído ambiental e condições adversas: As cavernas e outras formações subterrâneas possuem condições ambientais

time, which allows for better understanding and management of risks. The integration of monitoring technologies and the optimization of sensor layout are essential to maximize the potential of this tool.

3.3 Limitations, challenges and development needs for use

The following are the main limitations identified for microseismic monitoring of rock masses around caves:

- Complexity in data interpretation: One of the main challenges of microseismic monitoring is the correct interpretation of the captured signals. Many microseisms can be confused with noises unrelated to structural integrity (background noise), such as the impact of human activities, equipment movement or even environmental factors, such as changes in atmospheric pressure. Separating relevant seismic events from "background noise" requires sophisticated analysis and, often, highly trained professionals.
- Sensor range and sensitivity: Microseismic sensors have a limited detection range, which means that a large amount of equipment needs to be installed to cover large areas of a rock mass. It can be difficult to ensure that all relevant events are detected in large caves or caves with complex geometry.
- Depth limitation: In some cases, seismic events originating in deep layers may not be accurately captured by sensors on the surface or close to the cave of interest, compromising the detection of incipient instabilities.
- Costs and Infrastructure: Microseismic monitoring requires considerable infrastructure, including the installation of sensor networks, communication systems for real-time data transmission, and specialized processing software. The costs associated with the acquisition, installation, and maintenance of equipment, in addition to hiring specialists to interpret the data, can make it unfeasible for smaller or short-term projects.
- Environmental noise and adverse conditions: Caves and other underground formations have challenging environmental

desafiadoras, como alta umidade, variações de temperatura e a presença de água, que podem afetar a sensibilidade dos sensores sísmicos e comprometer sua durabilidade. Além disso, a atividade humana ou animal nas proximidades da caverna pode gerar sinais espúrios que dificultam a identificação dos microssismos de interesse.

No que se refere aos principais desafios para ampla implantação do monitoramento microssísmico de maciços rochosos no entorno de cavernas, temos:

- Desenvolvimento de sensores robustos e de longa duração: A criação de sensores sísmicos mais robustos, capazes de operar em condições ambientais adversas, como alta umidade e poeira, é essencial. Além disso, o desenvolvimento de sistemas de monitoramento com maior longevidade, que exijam menos manutenção, é crucial para garantir que o monitoramento contínuo seja viável em cavernas de difícil acesso.
- Melhoria dos algoritmos de interpretação de dados: O desenvolvimento de algoritmos avançados de processamento de dados, baseados em IA e aprendizado de máquina, pode ajudar a melhorar a interpretação dos sinais microssísmicos. Algoritmos capazes de diferenciar de forma mais eficaz entre sinais sísmicos significativos e ruídos de fundo, além de prever tendências de instabilidade, seriam uma adição valiosa ao monitoramento microssísmico.
- Aumento da sensibilidade e cobertura dos sensores: O avanço tecnológico no campo dos sensores sísmicos permitirá o desenvolvimento de dispositivos mais sensíveis, capazes de detectar sinais provenientes de maiores profundidades e em maiores áreas. Sensores compactos e de fácil instalação, que possam ser distribuídos ao longo de todo o maciço rochoso de forma eficiente, seriam fundamentais para garantir uma cobertura mais ampla e precisa.
- Integração com outras tecnologias: Uma solução promissora é a integração do monitoramento microssísmico com outras tecnologias, como modelagem geomecânica, monitoramento de deslocamentos via radar ou tecnologias de escâner a laser. A combinação dessas metodologias poderia oferecer uma visão mais completa do estado de estresse do maciço rochoso e das cavidades naturais subterrâneas, aumentando a precisão das previsões de instabilidade.

conditions, such as high humidity, temperature variations and the presence of water, which can affect the sensitivity of seismic sensors and compromise their durability. In addition, human or other animal activity in the vicinity of a monitored cave can generate spurious signals that make it difficult to identify the microseisms of interest.

The following are the main challenges for the widespread implementation of microseismic monitoring of rock masses around caves:

- Development of robust and long-lasting sensors: The development of more robust seismic sensors capable of operating in adverse environmental conditions, such as high humidity and dust, is essential. In addition, the development of monitoring systems with greater longevity, which require less maintenance, is crucial to ensure that continuous monitoring is feasible in caves that are difficult to access.
- Improved data interpretation algorithms: The development of advanced data processing algorithms, based on AI and machine learning, can help improve the interpretation of microseismic signals. Algorithms capable of more effectively differentiating between significant seismic signals and background noise, as well as predicting instability trends, would be a valuable addition to microseismic monitoring.
- Increased sensitivity and coverage of sensors: Technological advances in the field of seismic sensors will allow the development of more sensitive devices that are capable of detecting signals from greater depths and over larger areas. Compact and easy-to-install sensors that can be distributed efficiently throughout the rock mass would be essential to ensure broader and more accurate coverage.
- Integration with other technologies: A promising solution is the integration of microseismic monitoring with other technologies, such as geomechanical modeling, radar displacement monitoring or laser scanner technologies. The combination of these methodologies could provide a more complete view of the stress state of the rock mass and caves, thereby increasing the accuracy of instability predictions.

De forma geral, o monitoramento microssísmico representa uma ferramenta poderosa e promissora para a previsibilidade geomecânica dos maciços rochosos no entorno de cavidades naturais subterrâneas, fornecendo dados críticos para a prevenção de colapsos e instabilidades. Contudo, sua ampla adoção ainda requer avanços significativos em termos de robustez tecnológica, capacidade de interpretação de dados e redução de custos. À medida que essas lacunas forem preenchidas, o monitoramento microssísmico poderá se tornar uma ferramenta essencial na gestão de riscos em ambientes subterrâneos, especialmente em cavernas, melhorando tanto a segurança quanto a sustentabilidade das operações nesses locais.

4 POSSIBILIDADES E DESAFIOS PARA O USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM PROGRAMAS DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE FÍSICA DE CAVERNAS FERRÍFERAS

4.1 Introdução ao método e aplicações atuais

O uso de algoritmos de IA para modelagem de cenários de possíveis alterações físicas nas cavernas em rochas ferríferas nos arredores de empreendimentos ainda não é utilizado de forma ampla e sistematizada. Porém, é possível trabalhar com quaisquer tipos de dados, desde que coletados de forma correta e padronizada. As ferramentas de IA podem ser utilizadas, inclusive, no tratamento dos dados coletados para que permitam gerar modelos estatísticos robustos e encontrar as respostas para as perguntas do estudo. Isso pode incluir a remoção de *outliers*, correção de valores ausentes e padronização de formatos (Fayyad *et al*.,1996).

Para gerar um modelo preciso e confiável é necessário selecionar as características mais relevantes dos dados de modo que seja possível capturar os aspectos mais importantes para a modelagem dos cenários (Silva *et al*., 2016). É importante a correta escolha dos algoritmos que melhor se adaptam à natureza dos dados e dos objetivos específicos da modelagem. Nesse sentido, algoritmos de aprendizado de máquina como redes neurais, árvores de decisão, algoritmos de agrupamento (clusterização) e técnicas de aprendizado profundo (*deep learning*) devem ser considerados (Mohri *et al*., 2018).

Após a definição do algoritmo é necessário treinar e validar o modelo criado. Dessa forma, o próximo passo é treinar o modelo com os dados históricos disponíveis. É crucial validar o modelo

Overall, microseismic monitoring represents a powerful and promising tool for the geomechanical predictability of rock masses surrounding caves as it provides critical data for the prevention of collapses and instabilities. However, its widespread adoption still requires significant advances in terms of technological robustness, data interpretation capacity, and cost reduction. As these gaps are filled, microseismic monitoring could become an essential tool for risk management in subterranean environments, especially caves, by improving both the safety and sustainability of operations in these locations.

4 POSSIBILITIES AND CHALLENGES FOR THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN PROGRAMS FOR MONITORING THE PHYSICAL INTEGRITY OF FERRIFEROUS CAVES

4.1 Introduction to the method and current applications

The use of AI algorithms to model scenarios of possible physical changes in caves in iron-bearing rocks around mining projects is not yet widely and systematically used. However, it is possible to use AI with any type of data, as long as it is collected correctly and in a standardized manner. AI tools can also be used to process collected data to generate robust statistical models and find answers to study questions. This may include removing outliers, correcting missing values, and standardizing formats (Fayyad *et al*., 1996).

To generate an accurate and reliable model, it is necessary to select the most relevant features of the data so that the most important aspects for modeling scenarios can be captured (Silva *et al.*, 2016). It is important to correctly choose the algorithms that best adapt to the nature of the data and the specific objectives of the modeling. In this sense, machine learning algorithms, such as neural networks, decision trees, clustering algorithms, and deep learning techniques, should be considered (Mohri *et al.*, 2018).

After defining the algorithm, it is necessary to train and validate the created model. Therefore, the next step is to train the model with available historical data. It is crucial to validate

utilizando dados de validação ou técnicas de validação cruzada para garantir que ele seja robusto e compatibilize bem os novos dados.

Uma vez desenvolvido e validado, o modelo criado pode ser implementado para prever cenários futuros das cavernas localizadas no entorno de empreendimentos potencialmente poluidores ou degradadores desses ambientes. É importante monitorar continuamente o desempenho do modelo e realizar ajustes quando necessários, especialmente à medida que novos dados se tornam disponíveis.

Dessa forma, as principais aplicações da inteligência artificial em programas de monitoramento da integridade física de cavernas ferríferas em uso ou em estágio avançado de validação, destacam-se:

- Mecanismos de *Change Detection* com nuvens de pontos 3D e fotogrametria: Técnicas baseadas em IA, especialmente algoritmos de *deep learning* e redes neurais convolucionais (CNNs), vêm sendo empregadas para realizar detecção automática de mudanças geomorfológicas nas cavernas por meio da comparação de modelos tridimensionais ao longo do tempo. Esses modelos são gerados a partir de dados LiDAR, fotogrametria com drones ou câmeras de alta resolução.
- Modelos preditivos baseados em dados meteorológicos e sísmicos: Sistemas de IA têm sido integrados a redes de monitoramento meteorológico e sísmico para antecipar possíveis eventos de instabilidade física nas cavernas. Modelos baseados em *machine learning* (como *Random Forest*, *Support Vector Machines* – SVM e *Long Short-Term Memory* – LSTM) são treinados com séries temporais de chuvas intensas, variações de temperatura, umidade e microtremores sísmicos.
- Monitoramento por sensores e sistemas embarcados (*Internet of Things* – IoT + IA): Empresas de mineração vêm integrando instrumentos geotécnicos (extensômetros, inclinômetros, piezômetros e indicadores de nível de água) com algoritmos de IA para processamento em tempo real de grandes volumes de dados. Técnicas de aprendizado não supervisionado, como *clustering* e *autoencoders*, têm sido usadas para identificar padrões fora da normalidade.
- Classificação e inventário automatizado de feições espeleológicas: Projetos de catalogação de cavernas ferríferas têm usado IA para classificar e reconhecer feições

the model using validation data or cross-validation techniques to ensure that it is robust and compatible with new data.

Once developed and validated, the created model can be implemented to predict future scenarios for caves located around potentially polluting or degrading projects in these environments. It is important to continually monitor the model's performance and make adjustments, when necessary, especially as new data becomes available.

Thus, the main applications of AI in programs in use or at an advanced stage of validation for monitoring the physical integrity of ferriferous caves are:

- Change Detection mechanisms with 3D point clouds and photogrammetry: AI-based techniques, especially deep learning algorithms and convolutional neural networks (CNNs), have been used to automatically detect geomorphological changes in caves by comparing three-dimensional models over time. These models are generated from LiDAR data, drone photogrammetry or high-resolution cameras.
- Predictive models based on meteorological and seismic data: AI systems have been integrated into meteorological and seismic monitoring networks to anticipate possible physical instability events in caves. Models based on machine learning, such as Random Forest, Support Vector Machines (SVMs) and Long Short-Term Memory (LSTM), are trained with time series of intense rainfall and variations in temperature, humidity and seismic microtremors.
- Monitoring by sensors and embedded systems (Internet of Things – IoT + AI): Mining companies have been integrating geotechnical instruments (extensometers, inclinometers, piezometers and water level indicators) with AI algorithms for real-time processing of large volumes of data. Unsupervised learning techniques, such as clustering and autoencoders, have been used to identify abnormal patterns.
- Automated classification and inventory of cave features: Ferriferous cave cataloging projects have used AI to classify and recognize cave features in images, videos or 3D scans.

espeleológicas em imagens, vídeos ou digitalizações 3D. Essas informações alimentam bancos de dados ambientais e ajudam a avaliar o grau de relevância e a vulnerabilidade das cavernas.
- Integração multivariada de dados geológicos, geomecânicos e hidrogeológicos: Algoritmos de aprendizado supervisionado e *ensemble learning* estão sendo testados para correlacionar múltiplos parâmetros – como litologia, densidade de fraturas, profundidade da cava, nível freático e tensões induzidas – a fim de gerar mapas de risco para colapsos em cavernas.

Finalmente, os resultados dos modelos de IA devem ser interpretados em termos de suas implicações para as operações dos diferentes tipos de empreendimentos. Isso pode incluir recomendações para otimização de processos operacionais, mitigação de riscos geotécnicos (estabilidade física das cavernas) e para o planejamento de novas frentes de lavra.

4.2 Aplicações potenciais

Apesar de ainda incipiente, o uso da IA em programas de monitoramento da integridade física de cavernas ferríferas já apresenta aplicações práticas em alguns empreendimentos minerários. Além disso, essa técnica apresenta grande potencial de evolução nas aplicações futuras.

Dentre as aplicações potenciais da IA no monitoramento da integridade física de cavernas, destacam-se:

- Previsão de eventos críticos: redes neurais recorrentes (RNNs) e modelos baseados em aprendizado profundo têm sido testados para prever o risco de colapsos ou subsidências a partir da análise de grandes volumes de dados históricos e em tempo real.
- Simulação e otimização de cenários operacionais com IA generativa: Uma aplicação emergente da inteligência artificial é o uso de modelos generativos (como *Generative Adversarial Networks* – GANs) para criar cenários sintéticos, por exemplo, de lavra e evolução do maciço rochoso testando virtualmente diferentes estratégias operacionais. Esses modelos permitem simular o comportamento estrutural das cavernas frente aos diferentes avanços de lavra, às profundidades de corte ou alternativas de disposição de rejeito/estéril. A IA é capaz de sugerir ajustes nas estratégias que minimizem os impactos sobre as cavernas e

This information feeds into environmental databases and helps assess the relevance and vulnerability of caves.
- Multivariate integration of geological, geomechanical and hydrogeological data: Supervised learning and ensemble learning algorithms are being tested to correlate multiple parameters – such as lithology, fracture density, pit depth, water table and induced stresses – to generate hazard maps for cave collapses.

Finally, the results of AI models should be interpreted in terms of their implications for the operations of different types of projects. This may include recommendations for optimizing operational processes, mitigating geotechnical risks (physical stability of caves) and planning new mining fronts.

4.2 Potential applications

Although still in its infancy, the use of AI in programs to monitor the physical integrity of ferriferous caves already has practical applications for some mining projects. Furthermore, this technique has great potential for evolution in future applications.

The following stand out among the potential applications of AI for monitoring the physical integrity of caves:

- Forecasting critical events: Recurrent neural networks (RNNs) and models based on deep learning have been tested to predict the risk of collapses or subsidence based on the analysis of large volumes of historical and real-time data.
- Simulation and optimization of operational scenarios with generative AI: An emerging application of AI is the use of generative models (such as Generative Adversarial Networks – GANs) to create synthetic scenarios, for example, of mining and rock mass evolution, virtually testing different operational strategies. These models allow the simulation of the structural behavior of caves in the face of different mining advances, cutting depths or waste/tailings disposal alternatives. AI is able to suggest adjustments to strategies that minimize impacts on caves and maximize the physical safety of the system. This application is particularly useful

maximizem a segurança física do sistema. Essa aplicação é particularmente útil na fase de planejamento de lavra ou no redimensionamento de cavas em áreas com alta densidade de cavernas.

- Detecção automatizada de microfraturas e fissuras por imagens de alta resolução: Sistemas de visão computacional com suporte de IA estão sendo empregados na análise de imagens captadas por câmeras de alta resolução instaladas no interior das cavernas ou acopladas a drones e robôs exploradores. Através de redes neurais profundas, esses sistemas são treinados para identificar fissuras e microfraturas que possam indicar o início de processos de instabilidade. Essas trincas, muitas vezes imperceptíveis a olho nu, representam importantes precursores de colapsos em ambientes de alta tensão ou rebaixamento hidrogeológico. A detecção automatizada permite o mapeamento de áreas críticas com rapidez e maior cobertura, mesmo em locais de difícil acesso.

Apesar de promissoras, essas aplicações ainda enfrentam desafios, como a escassez de bases de dados bem estruturadas, a complexidade geológica dos sistemas ferruginosos e a dificuldade de acesso físico a muitas cavernas. No entanto, com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e do acesso a dados georreferenciados de alta resolução, espera-se que o uso da IA, nesse contexto, torne-se cada vez mais comum e relevante para a gestão ambiental e operacional dos empreendimentos minerários em áreas cársticas.

4.3 Limitações, desafios e necessidade de desenvolvimento para o uso

A seguir, no Tabela 1, são apresentadas algumas das principais técnicas utilizadas na bibliografia (Nola, 2022), com exemplos e potencialidades de suas aplicações e os desafios para sua ampla utilização em modelagem de cenários das cavernas no entorno das operações de empreendimentos potencialmente degradadores, como atividades minerárias. Tais técnicas podem ser empregadas em qualquer banco de dados históricos, possibilitando analisar as possíveis alterações nos dados monitorados a partir dos levantamentos com drone, robô e escâner a laser apresentados neste capítulo.

Com relação aos desafios para a ampla utilização dos métodos supracitados na modelagem de cenários das cavernas no entorno de empreendimentos, temos:

in the mining planning phase or in the resizing of caves in areas with high cave density.

- Automated detection of microfractures and fissures using high-resolution images: Computer vision systems supported by AI are being used to analyze images captured by high-resolution cameras installed inside caves or attached to drones or exploration robots. Using deep neural networks, these systems are trained to identify fissures and microfractures that may indicate the onset of instability processes. These cracks, often imperceptible to the naked eye, represent important precursors to collapses in high-stress or hydrogeological drawdown environments. Automated detection allows critical areas to be mapped quickly and with greater coverage, even in hard-to-reach locations.

Despite their promise, these applications still face challenges, such as the scarcity of well-structured databases, the geological complexity of ferruginous systems, and the difficulty of physically accessing many caves. However, with the advancement of remote sensing technologies and access to high-resolution georeferenced data, the use of AI in this context is expected to become increasingly common and relevant for the environmental and operational management of mining projects in karst areas.

4.3 Limitations, challenges and development needs for use

Table 1 presents some of the main techniques used in the bibliography (Nola, 2022), with examples and potential of their applications and the challenges for their widespread use in modeling cave scenarios around the operations of potentially degrading enterprises, such as mining activities. These techniques can be used with any historical database, which allows for the analysis of possible changes in the monitored data from surveys with drones, robots and laser scanners presented in this chapter.

Challenges for the widespread use of the aforementioned methods for modeling scenarios for caves around projects include the following:

- Desenvolvimento de algoritmos específicos: desenvolver algoritmos específicos para dados geológicos e geotécnicos que considerem as particularidades dos maciços rochosos em diferentes contextos geológicos.
- Integração de dados multissensoriais: A IA deve ser capaz de integrar de maneira eficiente dados de múltiplas fontes, como sensores sísmicos, sistemas de escâner a laser, monitoramento por drones e imagens de radar. Isso permitirá uma visão mais holística do comportamento do maciço rochoso e das cavernas.
- Sistemas de coleta em tempo real: O desenvolvimento de sistemas de coleta e transmissão de dados em tempo real é essencial para que os algoritmos de IA possam processar informações continuamente e fornecer previsões rápidas e precisas.
- Expansão de bancos de dados para treinamento do algoritmo: O sucesso dos algoritmos de IA depende da disponibilidade de dados amplos e bem-organizados. Portanto, deve-se investir na criação de bancos de dados robustos, com dados históricos detalhados e em tempo real sobre as cavernas monitoradas.
- Parcerias entre academia e indústria: Colaborações entre universidades, centros de pesquisa e empresas de mineração podem ajudar na coleta de dados padronizados e na criação de modelos preditivos mais precisos e aplicáveis a diferentes contextos.
- Integração da IA com a modelagem geomecânica tradicional: Embora os algoritmos de IA ofereçam vantagens significativas, eles não devem substituir completamente os métodos geomecânicos tradicionais. O desenvolvimento de soluções híbridas, que combinem IA com modelagem numérica baseada em princípios físicos, pode proporcionar previsões mais precisas e confiáveis.
- Redução de custos: O alto custo de implementação de sistemas baseados em IA é um obstáculo para muitas operações de mineração, especialmente em pequenos projetos. O desenvolvimento de soluções acessíveis e modulares é essencial para democratizar o uso da IA no setor.
- Capacitação técnica: Treinar geocientistas e engenheiros para trabalhar com IA é uma necessidade urgente. A criação de cursos de capacitação e o desenvolvimento de interfaces amigáveis para o usuário final podem facilitar a integração dessas tecnologias na mineração.

- Development of specific algorithms: develop specific algorithms for geological and geotechnical data that consider the particularities of rock masses in different geological contexts.
- Multisensory data integration: AI must be able to efficiently integrate data from multiple sources, such as seismic sensors, laser scanner systems, drone monitoring, and radar imagery. This will allow for a more holistic view of rock mass and cave behavior.
- Real-time collection systems: The development of real-time data collection and transmission systems is essential so that AI algorithms can process information continuously and provide fast and accurate predictions.
- Expansion of databases for algorithm training: The success of AI algorithms depends on the availability of broad and well-organized data. Therefore, investment should be made in the creation of robust databases with detailed historical and real-time data on the monitored caves.
- Partnerships between academia and industry: Collaborations between universities, research centers and mining companies can help in the collection of standardized data and in the creation of more accurate predictive models that are applicable to different contexts.
- Integrating AI with traditional geomechanical modeling: While AI algorithms offer significant advantages, they should not completely replace traditional geomechanical methods. Developing hybrid solutions that combine AI with numerical modeling based on physical principles can provide more accurate and reliable predictions.
- Cost reduction: The high cost of implementing AI-based systems is a barrier for many mining operations, especially for small projects. Developing affordable and modular solutions is essential to democratize the use of AI in the industry.
- Technical training: Training geoscientists and engineers to work with AI is an urgent need. Creating training courses and developing user-friendly interfaces for end users can facilitate the integration of these technologies into mining.

Tabela 1: Técnicas de análise e predição que podem ser utilizadas para modelagem de cenários das cavernas monitoradas no entorno dos empreendimentos.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Floresta Aleatória	A utilização de classificadores supervisionados através de regras de decisão, como é o caso do método floresta aleatória, consegue contribuir de forma relevante para a minimização de erros de classificação. Além disso, os modelos criados obtêm uma acurácia muito alta, normalmente superior a 90%.	Esse método demanda um período maior para treinar o modelo em comparação a outras técnicas, uma vez que envolve a construção de múltiplas árvores. Além disso, pode ser menos eficiente em termos de consumo de memória do dispositivo, pois cada árvore na floresta necessita ser armazenada separadamente na memória.
Redes Neurais Artificiais	Com base em um algoritmo básico criado, as redes neurais artificiais são capazes de auto aprender com os *inputs* realizados. Além disso, as redes neurais foram projetadas para aprender continuamente e melhorar seus resultados ao longo do tempo (aprendizado contínuo), o que pode facilitar muito as análises, em decorrência do grande volume de dados provenientes do planejamento de lavra e que, muitas vezes, não tem comunicação direta com parâmetros espeleológicos.	As redes neurais para obterem resultados satisfatórios e condizentes com a realidade de campo precisam de grandes volumes de dados para um treinamento eficaz, o que pode ser uma limitação em cenários onde os dados do planejamento de lavra disponíveis são escassos. Além disso, o treinamento de redes neurais pode ser intensivo em recursos, exigindo *hardware* especializado, e pode demandar muitas horas.
Clusterização	A clusterização ajuda a identificar grupos ou padrões ocultos em grandes conjuntos de dados e facilita a visualização e análise de dados complexos ao resumir informações em grupos. Dessa forma, essa técnica auxilia muito a tomada de decisão dentro de um cenário com ampla variedade de dados.	A eficácia do método pode depender da escolha de parâmetros (como o número de *clusters*), o que pode ser muito complexo. Além disso, os algoritmos de clusterização podem ser afetados por *outliers* e ruídos nos dados.
Técnicas de aprendizado profundo	O *deep learning* apresenta a capacidade de aprender representações hierárquicas e características dos dados sem a necessidade de extração manual. Além disso, funciona muito bem com grandes volumes de dados, melhorando o desempenho, conforme mais dados são adicionados.	Possui alto custo em termos de recursos computacionais e tempo de treinamento, muitas vezes exigindo infraestrutura especializada. Os modelos construídos podem ser, muitas vezes, de difícil interpretação.

Table 1: Analysis and prediction techniques that can be used to model scenarios for caves monitored in the vicinity of projects.

Technique	Advantages	Disadvantages
Random Forest	The use of supervised classifiers through decision rules, such as the random forest method, can significantly contribute to minimizing classification errors. Furthermore, the models created achieve very high accuracy, typically above 90%.	This method requires a longer period to train the model compared to other techniques, since it involves the construction of multiple trees. In addition, it may be less efficient in terms of device memory consumption, since each tree in the forest needs to be stored separately in memory.
Artificial Neural Networks	Based on a basic algorithm, artificial neural networks are capable of self-learning from the inputs provided. Furthermore, neural networks were designed to continuously learn and improve their results over time (continuous learning), which can greatly facilitate analyses, due to the large volume of data coming from mining planning and which often does not have direct communication with speleological parameters.	Neural networks need large volumes of data for effective training to obtain satisfactory results that are consistent with field reality, which can be a limitation in scenarios where available mining planning data are scarce. In addition, training neural networks can be resource-intensive, requiring specialized hardware, and can take many hours.
Clustering	Clustering helps identify hidden groups or patterns in large data sets and makes it easier to visualize and analyze complex data by summarizing information into groups. In this way, this technique greatly aids decision-making within a scenario with a wide variety of data.	The effectiveness of the method may depend on the choice of parameters (such as the number of clusters), which can be very complex. In addition, clustering algorithms can be affected by outliers and noise in the data.
Deep Learning Techniques	Deep learning has the ability to learn hierarchical representations and features from data without the need for manual extraction. It also works very well with large volumes of data, improving performance as more data is added.	It has a high cost in terms of computational resources and training time, often requiring specialized infrastructure. The models constructed can often be difficult to interpret.

5 GANHOS NA UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS E TECNOLOGIAS APRESENTADAS PARA O MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE FÍSICA DE CAVERNAS FERRÍFERAS

Os programas de monitoramento da integridade física de cavernas vinculados a processos de licenciamento ambiental, ou seja, de empreendimentos com potencial para impactar esses ambientes, atualmente são executados, na grande maioria, sem uso de métodos que reduzem a exposição de pessoas aos riscos inerentes à atividade. Além disso, majoritariamente precisam do acesso frequente de pessoas ao interior das cavernas, o que pode gerar perturbações no ambiente que, em muitos casos, podem ser até mais intensas do que o próprio empreendimento. Isso ocorre, pois nesses casos existem interferências diretas nas cavernas e na fauna associada (pisoteamento do solo, substratos

5 GAINS IN USING THE METHODS AND TECHNOLOGIES PRESENTED FOR MONITORING THE PHYSICAL INTEGRITY OF FERRIFEROUS CAVES

The programs for monitoring the physical integrity of caves linked to environmental licensing processes, i.e., projects with the potential to impact these environments, are currently carried out, in the vast majority, without the use of methods that reduce the exposure of people to the risks inherent to the activity. In addition, they mostly require frequent access by people to the interior of the caves, which can generate disturbances in the environment that, in many cases, can be even more intense than the project itself. This occurs because in these cases there is direct interference in the caves and with the associated fauna

orgânicos e da fauna de invertebrados, afugentamento de fauna em geral, alterações microclimáticas etc.). Desse modo, os métodos apresentados nesse capítulo permitem diminuir a frequência de pessoas acessando as cavernas e as consequências associadas a essa visitação. A seguir, são apresentados os principais ganhos na utilização desses métodos.

5.1 Melhora no processo de coleta e acompanhamento de dados

A utilização de microssísmica, veículos aéreos não tripulados (VANTs), drones e robôs permitem a coleta de dados mais precisos. Em comparação ao monitoramento com sismógrafos convencionais, a microssísmica é capaz de capturar vibrações de mais baixa intensidade, permitindo observar e corrigir a forma como as atividades estão sendo desenvolvidas no entorno das cavernas. A utilização de drones de espaço confinado, robôs e escâner a laser, permite a análise de fraturas e pontos de ruptura milimétricos, além de permitir que essa análise seja realizada em ambiente remoto e até mesmo com a aplicação de inteligência artificial com mecanismos de *change detection*. Esses métodos, como já comentado, possibilitam o monitoramento de regiões de difícil acesso, como áreas remotas ou de risco, sem a necessidade de intervenções humanas diretas, o que reduz custos e riscos às pessoas, além de minimizar os impactos ao ambiente cavernícola.

Esses métodos permitem conectar os dados levantados a sistemas de monitoramento remoto e *big data*, possibilitando o acompanhamento contínuo dos resultados, como as vibrações. Caso anomalias sejam detectadas, é possível identificar e corrigir em um curto espaço de tempo.

5.2 Análise preditiva para evitar impactos irreversíveis

O uso de ferramentas de IA permite gerar modelos estatísticos robustos e preditivos, ou seja, é possível usar os dados históricos dos monitoramentos, simular cenários de avanço do empreendimento e atividades no entorno das cavernas, além de identificar limiares em que as condições ambientais naturais podem mudar significativamente. Isso possibilita adotar medidas de controle e mitigação para evitar que impactos de fato ocorram. No caso do monitoramento da integridade física, é possível identificar padrões e tendências de dados de vibrações e geoestruturais para prever essas possíveis mudanças.

O desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial (IA) permite a integração dos dados de diferentes programas de monitoramento, tais como: vibrações, climáticos,

(trampling of the soil, organic substrates and invertebrate fauna, scaring away of fauna in general, microclimate changes, etc.). Thus, the methods presented in this chapter allow for a reduction in the frequency of people accessing the caves of interest and the consequences associated with such visitation. The main benefits of using these methods are presented below.

5.1 Improvement in the data collection and monitoring process

The use of microseismic systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), drones and robots allow for the collection of more accurate data. Compared to monitoring with conventional seismographs, microseismic systems are capable of capturing lower intensity vibrations, allowing for the observation and correction of how activities are being carried out in the cave environment. The use of confined space drones, robots and laser scanners allows fractures and millimeter rupture points to be analyzed, in addition to allowing this analysis to be performed in a remote environment and even with the application of artificial intelligence with change detection mechanisms. These methods, as already mentioned, allow for the monitoring of regions that are difficult to access, such as remote or risk areas, without the need for direct human intervention, which reduces costs and risks to people, in addition to minimizing impacts to the cave environment.

These methods allow the data collected to be connected to remote monitoring systems and “big data”, enabling continuous monitoring of results, such as vibrations. If anomalies are detected, they can be identified and corrected in a short period of time.

5.2 Predictive analysis to avoid irreversible impacts

The use of AI tools allows the generation of robust and predictive statistical models, i.e., it is possible to use historical monitoring data to simulate scenarios for the advancement of a project and activities in the surroundings of caves and identify thresholds at which natural environmental conditions may change significantly. This makes it possible to adopt control and mitigation measures to prevent impacts from actually occurring. In the case of physical integrity monitoring, it is possible to identify patterns and trends in vibration and geostructural data to predict these possible changes.

The development of artificial intelligence (AI) algorithms allows the integration of data from different monitoring

biológicos e estruturais em uma plataforma *online* e única. Isso facilita a análise holística dos potenciais impactos ambientais e a elaboração de planos de ação mais eficazes e coordenados.

Além disso, a análise preditiva associada ao acompanhamento em tempo real pode trazer mais segurança e mostrar que os empreendimentos estão executando todas as medidas de controle e mitigação necessárias para proteção do patrimônio espeleológico. Um outro ponto relevante é que podem ser criadas plataformas *web* para acesso de todos os interessados, tais como: empreendedor, empresa de consultoria, órgãos ambientais ou mesmo a sociedade civil. A transparência da informação pode melhorar a relação de confiança entre todos os envolvidos, bem como possibilitar a tomada de decisões em conjunto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias e métodos apresentados neste capítulo, apesar de não serem novos, ainda são pouco empregados nos programas de monitoramento da integridade física de cavernas. Equipamentos como drones e robôs com ferramentas acopladas, como escâner a laser ajudam a reduzir a necessidade de pessoas acessarem de forma frequente o interior e o entorno das cavernas. Esse fato aumenta a segurança operacional, principalmente em cavernas com fragilidades estruturais. Além disso, esses equipamentos podem adentrar locais que são inacessíveis para os seres humanos, melhorando e aumentando a eficácia do monitoramento do meio físico.

Em relação ao uso da microssísmica, o monitoramento do maciço rochoso onde a caverna está inserida pode ser interessante em alguns casos e dependendo do tipo de empreendimento e atividade no entorno, uma vez que esse tipo de monitoramento é capaz de mapear o início do processo de deformação das rochas, o fraturamento e a instabilidade do maciço; auxiliar na localização de zonas de maior risco; avaliar a resposta do maciço à atividade no entorno; estimar o perigo sísmico; emitir alertas e possibilitar a análise retroativa dos dados. A metodologia de monitoramento microssísmico do maciço pode ajudar na análise de previsibilidade da estabilidade física no entorno e no interior das cavernas.

Apesar do grande potencial do uso desses equipamentos e métodos para o mapeamento e monitoramento de cavernas, ainda existem limitações para uso em ampla escala e de programs, such as vibration, climate, biological and structural, into a single online platform. This facilitates the holistic analysis of potential environmental impacts and the development of more effective and coordinated action plans.

Furthermore, predictive analysis combined with real-time monitoring can provide greater assurance that ventures are implementing all the necessary control and mitigation measures to protect speleological heritage. Another important point is that web platforms can be created for access by all interested parties, such as entrepreneurs, consulting firms, environmental agencies or even civil society. Transparency of information can improve the relationship of trust between all parties involved, as well as enable joint decision-making.

6 FINAL CONSIDERATIONS

The technologies and methods presented in this chapter, although not new, are still little used in programs to monitor the physical integrity of caves. Equipment such as drones and robots with attached tools, such as laser scanners, help reduce the need for people to frequently access the interior and surroundings of caves. This increases operational safety, especially in caves with structural weaknesses. In addition, this equipment can enter places that are inaccessible to humans, improving and increasing the effectiveness of monitoring the physical environment.

Microseismic monitoring of the rock mass where the cave is located may be interesting in some cases and depending on the type of project and activity in the surrounding area, since this type of monitoring is capable of mapping the beginning of the rock deformation process and fracturing and instability of the mass; assisting in locating areas of greater risk; assessing the response of the mass to the activity in the surrounding area; estimating seismic hazard; issuing alerts; and enabling retroactive analysis of the data. Microseismic monitoring of the rock mass can help with the analysis of the predictability of physical stability in the surrounding area and inside the associated caves.

Despite the great potential of using these methods and equipment for mapping and monitoring caves, there are still limitations to their efficient and large-scale use. Improvements

forma eficiente. Ainda é necessária a melhoria em relação à possibilidade de navegação autônoma em ambientes sem referência geográfica por satélite, como as cavernas, ao aumento da autonomia dos equipamentos, aos sistemas de locomoção mais avançados, principalmente para os robôs e estudos mais robustos de microssísmica dos maciços rochosos aplicados à espeleologia.

A interdisciplinaridade é um ponto fundamental para a ampla implementação desses métodos e tecnologias para o monitoramento da integridade física das cavernas. A análise conjunta da engenharia, geologia, robótica e inteligência artificial será fundamental para garantir que as cavernas possam ser monitoradas com maior precisão, segurança e eficácia no futuro.

7 AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram para a elaboração deste capítulo, em especial à empresa Vale S.A. pelo investimento constante em pesquisa e inovação aplicada à conservação de cavernas. Às empresas de consultoria, aos pesquisadores e especialistas cujos estudos e publicações serviram de base para a construção desta pesquisa, nossa admiração e agradecimento pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos. Por fim, agradecemos aos colegas editores a oportunidade de contribuir com esta obra e o suporte durante o processo de publicação do capítulo.

are still needed in terms of the possibility of autonomous navigation in environments without satellite geographic reference, such as caves; increased equipment autonomy; more advanced locomotion systems, especially for robots; and more robust microseismic studies of rock masses applied to speleology.

Interdisciplinarity is a key factor in the widespread implementation of these methods and technologies for monitoring the physical integrity of caves. The joint analysis of engineering, geology, robotics and artificial intelligence will be essential to ensure that caves can be monitored with greater precision, safety and effectiveness in the future.

7 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our sincere gratitude to everyone who contributed to the preparation of this chapter, especially to Vale S.A. for its ongoing investment in research and innovation for to cave conservation. We would also like to express our admiration and gratitude to the consulting firms, researchers and experts whose studies and publications formed as the basis for the construction of this research, for the generosity in sharing their knowledge. Finally, we would like to thank our fellow editors for the opportunity to contribute to this work and for their support throughout the process of publishing process.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de parâmetros geomecânicos de uma cavidade natural subterrânea utilizando tecnologias de laser scanner 3D e realidade virtual**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2016.

AZPÚRUA, H. *et al*. EspeleoRobô: a robotic device to inspect confined environments. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS (ICAR), 19., 2019, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte, Brazil, 2019. p. 17–23. DOI: 10.1109/ICAR46387.2019.8981627

AZPÚRUA, H. *et al*. Towards semi-autonomous robotic inspection and mapping in confined spaces with the EspeleoRobô. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 101, n. 4, p. 1–27, 2021. DOI:10.1007/s10846-021-01321-5

BARBOSA, M. R. **Geofísica espeleológica**: metodologia para aplicação de eletrorresistividade na investigação de instabilidade litoestrutural de teto em cavidades ferríferas: cavidade N4E-0026, mina N4EN, Carajás, PA. 2018. 92 f. Tese (Pós-Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BARBOSA, M. R. *et al*. Breakdown mechanisms in iron caves: an example from Brazil. **International Journal of Speleology**, v. 48, n. 2, p. 179–190, 2019. DOI: 10.5038/1827-806X.48.2.2266

BRAGA, M. A. **Parecer técnico científico**: uso do monitoramento microssísmico no entorno de cavernas e subterrâneas em Serra Norte (Minas de N4 e N5). Rio de Janeiro: CPGA/ UFRJ, 2024. Relatório.

BRANDI, I. V. **Proposta de uma metodologia de classificação**

geotécnica aplicada a cavernas em litologias ferríferas. 2018. 336 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

BRANDI, I. *et al*. Geotecnia aplicada à previsibilidade em cavernas naturais subterrâneas situadas na área afetada por Lavra, Carajás – PA. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33., Eldorado, 2015. **Anais** [...]. Campinas: SBE, 2015. p. 533–541.

CANAVESE, E. P.; TEDESCHI, R.; FORTI, P. Laser scanner use in cave contexts: the cases of Castellana (Italy) and Naica (Mexico). *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15., 2009, [Kerrville]. **Proceedings** [...]. [Kerrville]: National Speleological Society, 2009.

COSSO, T.; FERRANDO, I.; ORLANDO, A. Surveying and mapping a cave using 3D laser scanner: the open challenge with free and open source software. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., v.** 40, n. 5, p. 181–186, 2014. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-181-2014.

DIAS, L. S. O. *et al*. A microseismic monitoring pilot project of natural caves in Carajás – PA. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 7., 2016, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto: SBGf, 2016.

ESA. THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Underground astronauts preparing for space**. Italy: ESA Publications, 2017.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. The KDD process for extracting useful knowledge from volumes of data. **Communications of the ACM**, v. 39, n. 11, p. 27–34, 1996.

FERNANDES, A. B. **Sistema de monitoramento de dinâmica de rocha (SMDR) aplicado ao controle geotécnico de uma cavidade natural subterrânea no município de São Gonçalo do Rio Abaixo – MG**. 2020. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

FERNANDES, A. B. *et al*. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 3, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2315

GONÇALVES, D. F. **Caracterização geológico-geotécnica em perfis lateríticos associados a cavidades da região de Carajás**. 2019. 136 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Lavra de Minas a Céu Aberto) – Instituto Tecnológico Vale, Parauapebas, 2019.

HERRANZ DE LA CASA, J. M.; BAUTISTA, P. S. From the 360º photo to the metaverse: conceptual and technical evolution of virtual and immersive journalism from Spain. **Brazilian Journalism Research**, v. 19, n. 2, p. 1–30, 2023. DOI: 10.25200/BJR.v19n2.2023.1562.

LIMA, A. T. *et al*. Utilização do Robot Operating System (ROS) em conjunto com o simulador V-REP no ensino da robótica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2018, [*s. l.*]. **Anais** [...]. Campinas: SBA, 2019. DOI: https://doi.org/10.20906/CBA2022/149

MENDECKI, A. J. Seismic ground motion alerts for mines. **Journal of Seismology**, v. 27, n 4, p. 599–608, 2023. DOI: 10.1007/s10950-023-10147-7.

MOHRI, M.; ROSTAMIZADEH, A.; TALWALKAR, A. **Foundations of machine learning**. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018.

NOLA, I. T. S. **Análise multicritério e aprendizado de máquina aplicados na predição do potencial espeleológico da região do Parque Nacional Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero / MG**. 2022. 138 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

NORÉN-COSGRIFF, K. M. *et al*. Building damage due to vibration from rock blasting. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 138, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106331

PETRÁČEK, P. *et al*. Large-scale exploration of cave environments by unmanned aerial vehicles. *In*: IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 2021. **Proceedings** [...]. [S.l.]: IEEE, Oct. 2021. p. 7596-7603. DOI: 10.1109/LRA.2021.3098304

RISBØL, O.; GUSTAVSEN, L. LiDAR from drones employed for mapping archaeology: potential, benefits and challenges. **Archaeological Prospection**, v. 25, n. 4, p. 329-338, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/arp.1712

SICILIANO, B. *et al*. **Robotics**: modelling, planning and control. [*S. l.*]: Springer Science & Business Media, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1

SILVA, L. A.; PERES, S. M.; BOSCARIOLI, C. **Introdução à mineração de dados**: com aplicações em R. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

TABIB, W. *et al*. Autonomous cave surveying with an aerial robot. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 38, n. 2, p. 1016–1032, 2022. DOI: 10.1109/TRO.2021.3104459

TORI, R.; HOUNSELL, M. S. (org.). **Introdução à realidade virtual e aumentada**. Porto Alegre: Editora SBC, 2018.

TORRES, M. C. D. **Desenvolvimento e implementação da eletrônica embarcada em um dispositivo robótico móvel para inspeção**: espeleorobô. 2022. 68 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

VALE S. A. **Workshop**: revisão dos atributos espeleométricos e atualização da relevância de nove cavidades. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2021. Relatório.

XIA, X. *et al*. A case study on rock damage prediction and control method for underground tunnels subjected to adjacent excavation blasting. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 35, p. 1-7, 2013. DOI: 10.1016/j.tust.2012.11.010



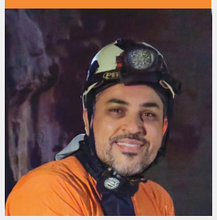
Caverna/Cave S11A_0036
Foto/Photo: Ataliba Coelho





Foto/Photo: André B. Machado

Organizadores Organizes



| MATHEUS HENRIQUE SIMÕES

Graduado em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS, 2010) e Mestre em Ecologia Aplicada pela Universidade Federal de Lavras (UFLA, 2013), com ênfase em ecologia e conservação de cavernas. Desde 2010, quando conheci minha primeira caverna, descobri a vocação para trabalhar com esses ambientes. A possibilidade de unir paixão pela natureza e aplicação prática do conhecimento para promover o desenvolvimento sustentável confirmou que estava no caminho certo. Desde então, tenho atuado como consultor ambiental, desenvolvendo estudos voltados ao Patrimônio Espeleológico e participando de pesquisas científicas para responder questões centrais sobre o tema. Hoje, como membro da equipe de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos da Vale S.A., sigo firme no propósito de conciliar desenvolvimento sustentável e preservação.

| MATHEUS HENRIQUE SIMÕES

I have a degree in Biological Sciences from Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS, 2010) and a Master's degree in Applied Ecology from the Universidade Federal de Lavras (UFLA, 2013), with an emphasis on cave ecology and conservation. In 2010, when I first visited a cave, I discovered my calling to work with these environments. The opportunity to combine my passion for nature with the practical application of knowledge to promote sustainable development confirmed that I was on the right path. Since then, I have worked as an environmental consultant, developing studies focused on Speleological Heritage and participating in scientific research to answer key questions on the topic. Today, as a member of the Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos team at Vale S.A., I remain steadfast in my commitment to reconciling sustainable development and conservation.





| ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

Biólogo formado pelo Centro Universitário Fundação Santo André (FSA), mestre em Ecologia Aplicada pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) e especialista em fauna subterrânea. Espeleólogo há 25 anos, dedico-me há 15 anos ao licenciamento ambiental de cavernas e áreas cársticas, conciliando pesquisa científica, desenvolvimento e conservação. Filiado ao Grupo de Estudos Ambientais da Serra do Mar (GESMAR) e ao Observatório Espeleológico, sou sócio-diretor da RZampaulo – Espeleologia e Consultoria Ambiental. Minha paixão por cavernas e pela fauna singular que nelas habita guia meu trabalho, unindo conhecimento, conservação e respeito por estes incríveis ecossistemas subterrâneos.

| IURI VIANA BRANDI

Graduado em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com pós-graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP), Economia Mineral pela École des Mines de Paris e doutorado em Geotecnia pela UFOP). Ao longo da carreira, tenho dedicado ao aprimoramento contínuo dos conhecimentos relacionados às ciências ambientais aplicadas à mineração. Desde 2010, concentro meus estudos em espeleologia, arqueologia e meio ambiente, incentivando o desenvolvimento e a aplicação de modelos preditivos, inovações tecnológicas e a otimização dos processos de monitoramento ambiental. A mais de 15 anos tenho atuado de forma ativa na consolidação de práticas voltadas à mineração sustentável e na formação de profissionais comprometidos com as questões ambientais no setor mineral.

| ROBSON DE ALMEIDA ZAMPAULO

I am a biologist, graduate of the Centro Universitário Fundação Santo André (FSA), with a Master's degree in Applied Ecology from the Universidade Federal de Lavras (UFLA), and a specialist in subterranean fauna. As a speleologist for 25 years, I have dedicated 15 years to the environmental licensing of caves and karst areas, combining scientific research, development, and conservation. Affiliated with the Grupo de Estudos Ambientais da Serra do Mar (GESMAR) and the Observatório Espeleológico, I am a managing partner of RZampaulo – Espeleologia e Consultoria Ambienta. My passion for caves and the unique fauna that inhabit them guides my work, combining knowledge, conservation, and respect for these incredible subterranean ecosystems.

| IURI VIANA BRANDI

With a degree in Mining Engineering from the Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), postgraduate degrees in Environmental Engineering from the Universidade de São Paulo (USP), Mineral Economics from the École des Mines de Paris, and a PhD in Geotechnics from UFOP, I have dedicated myself throughout my career to continuously improving my knowledge of environmental sciences applied to mining. Since 2010, I have focused my studies on speleology, archaeology, and the environment, encouraging the development and application of predictive models, technological innovations, and the optimization of environmental monitoring processes. For over 15 years, I have been actively involved in consolidating practices focused on sustainable mining and training professionals committed to environmental issues in the mining sector.

Agradecimentos

A realização desta obra representa a convergência de esforços de profissionais, instituições e lideranças que compartilham um mesmo propósito: promover a compatibilização entre o desenvolvimento econômico e a conservação do patrimônio espeleológico.

Aos consultores e às empresas que atuam na área, nosso profundo agradecimento pela experiência e pelo compromisso com a qualidade técnica, essenciais para consolidação dos conteúdos aqui apresentados. Reconhecemos, igualmente, a contribuição dos órgãos ambientais, cuja atuação criteriosa e o diálogo construtivo têm sido fundamentais para o avanço da governança ambiental no país. Em especial, agradecemos aos analistas técnicos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad) e da Fundação Estadual de Meio Ambiente (Feam) de Minas Gerais, cuja atuação motivou esta publicação e aos profissionais da Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos da Vale, os quais viabilizaram essa publicação.

Nossa gratidão especial aos autores dos capítulos, que dedicaram tempo, conhecimento e entusiasmo para compartilhar metodologias, resultados e reflexões, tornando esta obra plural e abrangente.

Registramos, ainda, o apoio decisivo da liderança da Vale, em especial à Diretoria de Licenciamento e Regulatório e a Gerência de Espeleologia e Tecnologia, cuja visão estratégica e incentivo à inovação possibilitaram a concretização deste projeto.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada, nosso mais sincero reconhecimento. Que este livro sirva como referência técnica e como inspiração para que ciência, gestão e desenvolvimento sustentável caminhem juntos.

Acknowledements

The completion of this work represents the convergence of efforts of professionals, institutions, and leaders who share the same purpose: to promote compatibility between economic development and the conservation of speleological heritage.

We extend our deepest gratitude to the consultants and companies operating in this field for their expertise and commitment to technical quality, essential to the consolidation of the content presented here. We also acknowledge the contribution of environmental agencies, whose careful action and constructive dialogue have been fundamental to the advancement of environmental governance in Brazil. We especially thank the technical analysts at the Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad) and the Fundação Estadual de Meio Ambiente (Feam) de Minas Gerais, whose work motivated this publication, as well as the professionals at the Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos of Vale, who made this publication possible.

Our special gratitude goes to the chapter authors, who dedicated time, knowledge, and enthusiasm to sharing methodologies, results, and reflections, making this work plural and comprehensive.

We also acknowledge the decisive support of Vale's leadership, especially the Diretoria de Licenciamento e Regulatório e a Gerência de Espeleologia e Tecnologia, whose strategic vision and encouragement of innovation made this project possible.

To all who, directly or indirectly, contributed to this journey, we offer our sincerest gratitude. May this book serve as a technical reference and as an inspiration for science, management, and sustainable development to move forward together.



Caverna/Cave PDI_0013
Foto/Photo: Ataliba Coelho



O ambiente cárstico caracteriza-se por sua fragilidade e pela interligação intrínseca entre a superfície, o epicarste e o sistema subterrâneo, formando ambientes altamente sensíveis às alterações no solo e no uso do território. No contexto do licenciamento ambiental, o monitoramento constitui um componente estratégico, não apenas complementar, mas indispensável, compondo, com os estudos ambientais e a avaliação de impactos, o tripé que sustenta decisões técnicas consistentes. Ao registrar mudanças na hidrologia, no microclima, na fauna ou na estrutura das cavernas, o monitoramento antecipa riscos e fornece elementos essenciais para o planejamento. Ele permite avaliar a eficácia das intervenções e das medidas mitigadoras e assegurar a devida proteção do patrimônio espeleológico. Este guia apresenta conceitos, protocolos e boas práticas que permitem identificar fragilidades, reconhecer sinais precoces e avaliar a efetividade das ações de gestão e conservação. Ao sistematizar procedimentos técnicos aplicáveis às cavidades ferríferas, a obra fortalece o monitoramento como instrumento estratégico para um licenciamento robusto, garantindo que o desenvolvimento humano seja compatível com a integridade desses ambientes subterrâneos singulares.

JOCY BRANDÃO CRUZ
Coordenador do ICMBio/Cecav

The karst environment is characterized by its fragility and the intrinsic interconnection between the surface, the epicarst, and the subterranean system, creating environments highly sensitive to changes in soil and land use. Monitoring constitutes a strategic component in the context of environmental licensing, not only complementary but indispensable, together with environmental studies and impact assessments, the three pillars that underpin consistent technical decisions. By recording changes in hydrology, microclimate, fauna, or cave structure, monitoring anticipates risks and provides essential elements for planning. It enables the assessment of the effectiveness of interventions and mitigation measures and ensures the proper protection of speleological heritage. This guide presents concepts, protocols, and best practices that allow for the identification of vulnerabilities, recognition of early signs, and evaluation of the effectiveness of management and conservation actions. By systematizing technical procedures applicable to ferriferous caves, this work strengthens monitoring as a strategic instrument for robust licensing, ensuring that human development is compatible with the integrity of these unique subterranean environments.

JOCY BRANDÃO CRUZ
Coordenador do ICMBio/Cecav